



**UNIVERSIDADE
ESTADUAL DO
MARANHÃO**

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DA COMPUTAÇÃO E
SISTEMAS

ARIANNE DOS SANTOS FERREIRA EVANGELISTA

**DESENVOLVIMENTO DE ANTENAS EM POLIAMIDA
COM A GEOMETRIA PRÉ-FRACTAL DE KOCH**

São Luís

2020

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DA COMPUTAÇÃO E
SISTEMAS

ARIANNE DOS SANTOS FERREIRA EVANGELISTA

**DESENVOLVIMENTO DE ANTENAS EM POLIAMIDA
COM A GEOMETRIA PRÉ-FRACTAL DE KOCH**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós
- Graduação em Engenharia da Computação e
Sistemas da Universidade Estadual do Maranhão,
como requisito necessário para obtenção do grau
de Mestre em Engenharia da Computação e Sis-
temas.

São Luís

2020

Evangelista, Arianne dos Santos Ferreira.

Desenvolvimento de antenas em poliamida com a geometria pré-fractal de Koch /
Arianne dos Santos Ferreira Evangelista. – São Luís, 2020.

64 f

Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia de Computação e Sistemas,
Universidade Estadual do Maranhão, 2020.

Orientador: Prof. Dr. Ewaldo Éder Carvalho Santana.

1.Antena de microfita. 2.Fractal. 3.Pré-fractal de Koch. 4.Poliamida. I.Título

CDU: 621.396.67

ARIANNE DOS SANTOS FERREIRA EVANGELISTA

**DESENVOLVIMENTO DE ANTENAS EM POLIAMIDA
COM A GEOMETRIA PRÉ-FRACTAL DE KOCH**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós -
Graduação em Engenharia da Computação e
Sistemas da Universidade Estadual do
Maranhão, como requisito necessário para
obtenção do grau de Mestre em Engenharia da
Computação e Sistemas.

Trabalho aprovado. São Luís, 22 de junho de 2020:

Prof. Dr. Ewaldo Eder Santana
Orientador

**Prof. Dr. Paulo Fernandes da Silva
Junior**
Coorientador

Prof. Dr. Mauro Sérgio Silva Pinto
Primeiro Membro da Banca

**Prof. MSc. Denner Robert Rodrigues
Guilhon**
Segundo Membro da Banca

RESUMO

Nesta Dissertação é desenvolvido um projeto de antenas com pré-fractal de Koch retangular com três interações, construídas em poliamida, para operar na banda de Frequência Ultra-alta e ser utilizadas em aplicações na área médica. A equação para geração do pré-fractal foi implementado no programa MATLAB, com as imagens exportadas em formato DXF e simuladas no programa comercial ANSYS. A poliamida apresenta características de resistência mecânica e térmica adequadas para aplicações vestíveis que exigem resistência a altas temperaturas e resistência a movimentos constantes. O uso das geometrias pré-fractal de Koch na antena quadrada fornece uma redução de 20,3% na frequência de ressonância e 30° na largura de feixe de meia potência, tornando-a mais direcional (primeira iteração). A antena vestível com terceira iteração do pré-fractal de Koch demonstra ter ganho máximo na frequência de ressonância de 5,57 dBi e densidade de corrente de 41 A/m².

Palavras-chave: Antena de microfita. Fractal. Pré-fractal de Koch. Poliamida.

ABSTRACT

In this project, it is presented a rectangular Koch pre-fractal patch antenna until three iterations on wearable flexible polyamide dielectric operating in the ultrahigh frequency band for medical wireless applications. The antennas were implemented by MATLAB, with generated images simulated in commercial software ANSYS. The polyamide presents characteristics of mechanical and thermal resistance suitable for wearable applications that require hightemperature resistance and constant movement. The use of Koch pre-fractal geometries from square patch antenna provides a decrease of 20.3% in resonance frequency, and 30° in half-power beamwidth, making it more directional (first iteration). The wearable patch antenna with Koch pre-fractal for the third iteration shows maximum a gain at the resonanc frequency of 5.57 dBi, and a current density of 41 A/m².

Keywords: Patch Antenna. Fractal. Koch Pré-fractal. Polyamide.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Ilustração de antenas filamentosas (BALANIS, 2016).	16
Figura 2.2 – Configurações de antenas de abertura (BALANIS, 2016).	17
Figura 2.3 – Exemplo de antena de microfita – <i>patch</i> (Fonte: Autor).	17
Figura 2.4 – Representação 2D do diagrama de irradiação de uma antena isotrópica (Fonte: Autor).	19
Figura 2.5 – Representação de diagrama de irradiação direcional (Fonte: Autor). . .	19
Figura 2.6 – Representação do diagrama de irradiação dos planos H e E de uma antena omnidirecional (LONDOÑO, 2009).	20
Figura 2.7 – Ilustração do <i>HPBW</i> (STUTZMAN, 2012).	21
Figura 2.8 – Relação frente-costas (Fonte: Autor).	22
Figura 2.9 – Diagrama de diretividade em duas dimensões de um dipolo (Fonte: Autor).	23
Figura 2.10–Diagrama de diretividade em três dimensões de um dipolo de $\lambda/2$ (BALANIS, 2016).	23
Figura 2.11–Representação de uma antena de microfita quadrada (BALANIS, 2016). .	26
Figura 2.12–Ilustração do método de alimentação por linha de transmissão (Fonte: Autor).	27
Figura 2.13–Imagem ilustrativa do método de alimentação por cabo coaxial (STUTZ- MAN, 2012).	28
Figura 2.14–Método de alimentação por acoplamento por abertura (Fonte: Autor). .	28
Figura 2.15–Método de alimentação por acoplamento por proximidade (Fonte: Autor). .	29
Figura 2.16–Método de Análise por Linha de Transmissão (BALANIS, 2016). . . .	30
Figura 2.17–Geometria de uma antena de microfita retangular (BALANIS, 2016). .	30
Figura 2.18–a) Antena <i>patch</i> têxtil em formato de anel colada em substrato jeans (CHOWDHURY, 2012); Antena <i>patch</i> quadrada também colada em substrato em jeans (SHAVIT, 2017).	32
Figura 3.1 – a) Ilha da Esmeralda vista de cima com uma área ao sul selecionada; b) Sul da Ilha da Esmeralda com zoom e uma área da costa selecionada ao sul; c) Crookhaven parte selecionada na Figura 3.1b aumentada e com uma pequena parte da costa selecionada ao sul; d) Ponta da costa da Ilha da Esmeralda selecionada na Figura 3.1c com zoom (GOOGLE, 2020).	37

Figura 3.2 – Exemplos de fractais na natureza: a) Folhas de samambaia possuem autosimilaridade (MOTTA, 2015); b) Brócolis romanesco seus pequenos galhos em formatos pontiagudos possuem outras pontas menores similares às maiores (MOTTA, 2015); c) floco de neve, suas partes também apresentem autosimilaridade (OSÓRIO, 2010).	38
Figura 3.3 – Ilustração do conjunto do cantor (FALCONER, 2014).	39
Figura 3.4 – a) Construção da curva F de von Koch. Em cada estágio, o terço médio de cada intervalo é substituído pelos outros dois lados de um triângulo equilátero; b) Três curvas de von Koch encaixadas, em forma de triângulo, para formar uma curva de floco de neve (MANDELBROT, 1983).	40
Figura 3.5 – Etapas da construção de uma curva de Koch quadrada (FALCONER, 2014).	41
Figura 3.6 – A construção do conjunto de Sierpinski (MANDELBROT, 1983). . . .	42
Figura 3.7 – Antena bicônica dentro de um esfera (BALANIS, 2016).	44
Figura 3.8 – Gerador de Fractal: a) Estrutura fractal gerada a partir de um quadrado com gerador também quadrado tendo 3 iterações; b) Estrutura fractal gerada a partir de um triângulo com gerador em forma triangular com 4 iterações (BALANIS, 2016).	45
Figura 4.1 – Configuração de caracterização da Poliamida (Fonte: Autor).	48
Figura 4.2 – a) Representações das dimensões dos retângulos retirados a cada iteração. b) Projeto das antenas quadrada e antenas com pré-fractal de Koch com uma, duas e três iterações, respectivamente. c) Protótipos de antenas de microfita desenvolvidas neste trabalho (Fonte: Autor).	49
Figura 4.3 – Configuração de testes realizados nos protótipos de antenas (Fonte: Autor).	50
Figura 4.4 – Comparação dos resultados dos parâmetros $ S_{11} $ simulados e medidos para a antena <i>patch</i> quadrada (Fonte: Autor).	50
Figura 4.5 – Comparação dos resultados dos parâmetros $ S_{11} $ simulados e medidos para da antena com pré-fractal de Koch na primeira iteração (Fonte: Autor).	51
Figura 4.6 – Comparação dos resultados dos parâmetros $ S_{11} $ simulados e medidos para da antena com pré-fractal de Koch na segunda iteração (Fonte: Autor).	51
Figura 4.7 – Comparação dos resultados dos parâmetros $ S_{11} $ simulados e medidos para da antena com pré-fractal de Koch na terceira iteração (Fonte: Autor).	52
Figura 4.8 – Comparação dos resultados dos parâmetros $ S_{11} $ medidos nos quatro protótipos de antenas desenvolvidos neste trabalho (Fonte: Autor). . .	52

Figura 4.9 – Diagramas de irradiação 3D: a) Antena Quadrada com frequência de ressonância de 2,63 GHz; b) Antena com primeira iteração do pré-Fractal de Koch e frequência de ressonância de 2,12 GHz; c) Antena com segunda iteração do pré-Fractal de Koch e frequência de ressonância de 2,17 GHz; d) Antena com terceira iteração do pré-Fractal de Koch e frequência de ressonância de 2,25 GHz (Fonte: Autor).	54
Figura 4.10–Densidades de corrente: a) antena quadrada; b) antena com primeira iteração do pré-fractl de Koch; c) antena com segunda iteração do pré-fractl de Koch; d) antena com terceira iteração do pré-fractl de Koch (Fonte: Autor).	55
Figura 4.11–Impedâncias na carta de Smith: a) Antena quadrada 50.06Ω ; b) Antena com primeira iteração do pré-fractal de Koch 49.73Ω ; c) Antena com segunda iteração do pré-fractal de Koch 53.40Ω ; d) Antena com terceira iteração do pré-fractal de Koch 49.02Ω (Fonte: Autor).	56
Figura 4.12–Diagrama de irradiação 2D com largura de feixe de meia potência (HPBW) e relação frente costas: a) Antena quadrada; b) Antena com pré-fractal de Koch 1; c) Antena com pré-fractal de Koch 2; c) Antena com pré-fractal de Koch (Fonte: Autor).	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BW	<i>Bandwidth</i> - Largura de Banda
HPBW	<i>Half-Power Beamwidth</i> – Largura de Feixe de Meia Potência
IoT	<i>Internet of things</i> - Internet das Coisas
WBAN	<i>Wireless Body Area Network</i> - Redes Sem Fio Junto ao Corpo
WPAN	<i>Wireless Personal Area Network</i> - Redes pessoais sem fio
UWB	<i>Ultrawide band</i> - Banda Ultra Larga
UHF	<i>Ultrahigh Frequency</i> - Frequência Ultra-alta
VNA	<i>Vector Network Analyzer</i> - Analisador de Rede Vetorial

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Objetivos	15
1.2	Organização do Texto	15
2	ANTENAS	16
2.1	Parâmetros Fundamentais	18
2.1.1	Diagrama de Irradiação	18
2.1.2	Largura de Feixe de Meia Potência	20
2.1.3	Relação Frente - Costas	21
2.1.4	Diretividade e Ganho	22
2.1.5	Impedância de Entrada e Largura de Banda	24
2.2	Antenas de Microfita	25
2.2.1	Métodos de Alimentação	27
2.2.1.1	Linha de microfita	27
2.2.1.2	Cabo coaxial	27
2.2.1.3	Acoplamento por abertura	28
2.2.1.4	Acoplamento por proximidade	28
2.2.2	Métodos de Análise	29
2.2.2.1	Linha de transmissão	29
2.2.2.2	Cavidade	30
2.3	Antenas Flexíveis	31
2.4	Frequências Ultra-altas	33
3	GEOMETRIA FRACTAL	35
3.1	Características dos fractais	42
3.2	Fractais em Antenas	43
4	RESULTADOS	47
4.1	Procedimentos Metodológicos	47
4.2	Antenas em Poliamida com a Geometria Pré-fractal de Koch	48
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	60
5.1	Trabalhos Futuros	60
5.2	Artigos Publicados	61
	REFERÊNCIAS	62

1 INTRODUÇÃO

A humanidade está em constante desenvolvimento e desde a Segunda Guerra Mundial a tecnologia tem avançado de forma rápida, de modo que, em menos de um século inúmeras tecnologias e protocolos foram criados e fazem parte da vida cotidiana, como é o caso da telecomunicação. A partir da década de 1980, com o lançamento do primeiro telefone móvel, pesquisas em miniaturização de componentes eletrônicos, antenas, protocolos e aplicações de comunicação sem fio têm sido largamente realizadas para suprir a necessidade atual de troca de informações em tempo real. Os resultados destes trabalhos podem ser apreciados, por exemplo, pelo uso de aparelhos celulares e *tablets* com internet móvel, vídeos de alta resolução, aplicações com Internet das Coisas (*Internet of Things* - IoT) e comunicações via satélite (STUTZMAN, 2012), (PARUI, 2018).

Diversas áreas empregam comunicações como por exemplo: comunicação por voz, vídeo e dados; serviços de localização, identificação, controle e aplicações médicas. Para que este tipo de comunicação ocorra é necessário a utilização de antenas. Nas comunicações sem fio as antenas são dispositivos capazes de transmitir sinais eletromagnéticos sem fio, assim seu estudo promove ganhos no processo de envio e recebimento de sinais (STUTZMAN, 2012). Existem diversos tipos de antenas, a escolha desta varia de acordo com a necessidade da aplicação em que será utilizada.

Redes sem fio junto ao corpo (WBAN - *Wireless Body Area Network*), são redes de dispositivos portáteis capazes de se comunicar sem fio (EL-BENDARY, 2015). Aplicações WBAN, muitas vezes, exigem antenas flexíveis devido ao movimento do corpo e, mesmo sendo dobradas, amassadas ou esticadas, não devem sofrer perdas em suas características de transmissão. Muitos materiais podem ser utilizados na confecção de antenas flexíveis, como exemplo: papel, filmes de poliamida, poliéster, filmes de polímeros de cristal líquido, PDMS (*polydimethylsiloxane*), tecidos e etc. Antenas deste tipo, também são conhecidas como antenas vestíveis e podem ser empregadas como acessório ou como parte de vestimentas (SHARMA et al., 2016).

Pesquisas em antenas vestíveis são importantes, pois fazem parte de modernos sistemas de comunicação sem fio. Essas antenas despertaram interesse dos pesquisadores devido características como: fácil interação com o corpo, baixo impacto visual, baixo custo e, em alguns casos, estrutura flexível. Para atender a esses requisitos, o desenvolvimento desse tipo de antena deve seguir diferentes etapas como seleção e caracterização do material, projeto e fabricação da antena e, finalmente, medições (KHALEEL, 2014).

As tecnologias vestíveis para uso em redes sem fio estão diretamente relacionadas à rede de área corporal sem fio (WBAN), em aplicações no monitoramento de pessoas em

cuidados médicos, atletas, soldados ou segurança de pessoal, operando em várias faixas de frequência (SHAFIQUE et al., 2016). Vários materiais e geometrias foram utilizados para pesquisas em antenas vestíveis para desenvolver dispositivos operando em diferentes frequências de ressonância. Em Silva Junior (2016), foi desenvolvida uma antena têxtil de inspiração biológica na folha de *ginkgo Biloba*, gerada pela fórmula Gielis, construída em jeans para as tecnologias 2G, 3G e 4G. Kumar (2013) apresentou algumas antenas de banda ultra larga (UWB), construídas em material têxtil e fibra de vidro (FR4) para aplicações vestíveis usadas junto ao corpo. Em Hashmi (2016), é apresentado o desempenho do conjunto de antenas de microfita têxteis projetadas para rede de área corporal médica (MBAN). Em Silva Junior et al. (2018) antenas bioinspiradas geradas pela fórmula de Gielis foram apresentadas. No substrato denim, um monopolo impresso com formato de flor de jasmim foi desenvolvido na banda celular 2G, 3G e 4G, e uma antena de patch, com o formato bioinspirado de *Bidens pilosa*, foi desenvolvida para a rede local sem fio (WLAN) em 2.4 GHz. No substrato de poliamida, um conjunto de antena adesivas com a forma bioinspirada na folha de *Inga maritimus* foi desenvolvido para a banda WLAN a 5 GHz. No trabalho de Parui (2018) foi realizado um estudo de uma antena *patch* quadrada em substrato jeans, projetada para ressoar 1 - 6,58 GHz, faixa de banda ultra larga, (*Ultra Wideband* - UWB), em que incrementou na parte inferior do *patch* um serrilhamento para conseguir a largura de banda desejada. Em Shavit (2017) uma antena de microfita retangular foi fabricada para ressoar na frequência de 2.45GHz e ser utilizada para envio de informações por bluetooth e Wi-Fi em aplicações WBAN. No trabalho de Mersani e Osman (2016) foram apresentadas antenas de microfita retangulares com fenda em formato de L e borda em forma de degraus no meio da antena, utilizando jeans e poliéster como substrato, como condutores foram usados *Pure Copper Polyester Taffeta Fabric*, que é um tecido fabricado com cobre, poliéster e tafetá outro material escolhido foi o *zelt*. Essas antenas foram projetadas para a faixa de operação 2,25 GHz a 2,74 GHz e 4,3 GHz a 6,8 GHz, que correspondem às bandas WLAN e WiMAX. Em Kavitha e Swaminathan (2018) é desenvolvida uma antena do tipo monopolo que atua na banda de 2,45 GHz, ou seja, bandas industriais, médicas e científicas. Em Wang e Yang (2017) é mostrado um arranjo de 16 antenas de microfita "Quasi-Yagi" operando na frequência de 3.5 GHz para aplicações 5G em veículos.

As geometrias fractal e pré-fractal têm grande utilidade no desenvolvimento de dispositivos como superfície seletiva de frequência (FSS) e antenas (HASHMI, 2016), (D'ASSUNÇÃO, 2012). A geometria dos fractais foi definida como uma classe de objetos com a estrutura fina em escalas arbitrariamente pequenas, com características de auto-similaridade e preenchimento de espaço (MANDELROT, 1983), (FALCONER, 2014). De acordo com Rahmat-Samii (2003), o desenvolvimento da geometria fractal define uma classe de objetos, gerados por métodos iterativos, e a diferença entre estruturas pré-fractal e fractal é: fractal é gerado pela repetição de uma forma um número infinito de vezes

"enquanto um pré-fractal é a estrutura resultante se o processo iterativo for truncado após um número finito de vezes" (RAHMAT-SAMII, 2003).

As características e vantagens dos conceitos de fractal foram estendidos à teoria e ao design das antenas. Uma das vantagens, por exemplo, é o aumento do perímetro das estruturas, mantendo a área constante para que seja possível aumentar o comprimento elétrico das antenas sem o uso de formas diferentes. Por tais motivos geometrias fractais se tornaram alvo de vários estudos e implementações de diferentes elementos de antenas fractal como o trabalho de Wang e Li (2017) que produziu um sensor para uma antena fractal Moore foi projetado para detectar descargas parciais (PD) em subestações isoladas a gás para UHF. Em que os resultados mostram que a antena fractal de Moore tinha boa diretividade e características de radiação omnidirecional. Z.C.Alex (2013) utilizou em sua pesquisa o fractal de Koch como técnica para diminuir o tamanho de um dipolo e conseguiu uma redução de 32% comparado com um dipolo tradicional com a mesma frequência. O trabalho realizado por Silva Junior et al. (2018) apresenta um conjunto de antenas on-chip com fractal de Koch aperture-coupled operando na banda ISM de 60GHz, em que conseguiu aumento de 142% no ganho em dBi aplicando este fractal. Em seu trabalho, Yang (2018) desenvolve uma antena planar banda larga com o fractal floco de neve de Koch para aplicações da segunda à quarta geração de telefonia móvel, WLAN e aplicações de navegação como GPS. Jiang (2012) propõe uma antena fractal com o conjunto do Cantor para aplicações em banda ultra larga (UWB) que varia de 4,5 GHz a 10,6 GHz. Já o trabalho de Hedayati (2014) apresenta uma antena dipolo de microfita que utiliza os conjuntos fractais de Sierpinski, Hilbert e Giuseppe Peano em sua estrutura para alcançar as características desejadas e ser utilizadas em aplicações multibanda nos sistemas UWB, as simulações da antena e as medições do protótipo fabricado, demonstram que para perda de retorno, diagrama de irradiação e ganho a antena projetada alcançou suas especificações para aplicações de miniaturização, compactação e multibanda em uma estrutura simples e, também, obteve boa correspondência de impedância de entrada. Ghatak e Poddar (2017) desenvolveram uma antena bioinspirada na folha da samambaia, considerada fractal da natureza, para sistemas de imagens de microondas e esta estrutura demonstrou largura de banda fracionária ultra ampla em 175% além de alto ganho de diretiva de 10 dBi.

Os trabalhos encontrados na literatura, citados anteriormente, utilizam inúmeros materiais para desenvolvimento e diversos métodos de miniaturização de antenas. Entretanto, tais trabalhos não apresentam o uso da geometria fractal em conjunto com a poliamida, material flexível de espessura fina, resistência mecânica e térmica adequada para aplicações vestíveis que exigem resistência a altas temperaturas e movimento constante.

1.1 OBJETIVOS

A grande necessidade de miniaturização de componentes, baixo impacto visual e uso sem fio implica no desenvolvimento de antenas que possuam também estes requisitos, visto que, a geometria fractal satisfaz tais exigências, o objetivo deste trabalho é projetar e construir antenas de microfitas flexíveis com substrato em poliamida e partes ressoantes em cobre laminado utilizando até três iterações de fractais quadrados de Koch para ressoar em Frequências Ultra-altas e serem utilizadas em aplicações médicas. Para alcançar o objetivo geral deste trabalho, foram traçados os seguintes objetivos específicos:

- Investigar, a partir do levantamento bibliográfico, as principais características de antenas de microfita em substratos flexíveis;
- Identificar, a partir do levantamento bibliográfico e experimental, o efeito das geometrias fractais em tecnologia de microfita com substratos flexíveis;
- Fazer simulações das estruturas propostas verificando os resultados obtidos referentes aos seus parâmetros fundamentais;
- Realizar a caracterização do substrato utilizado no projeto;
- Desenvolver protótipos;
- Mensurar estruturas projetadas e simuladas em tecnologia de microfita com substrato flexível;
- Comparar resultados simulados aos medidos, verificando se há discrepâncias entre eles.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

No capítulo 2, é apresentada uma revisão bibliográfica sobre a teoria de antenas, seus parâmetros fundamentais e as principais características de antenas de microfita. Bem como, são explanadas ideias sobre antenas flexíveis e falado sobre a faixa UHF (Ultra High Frequency). O Capítulo 3, aborda os conceitos, características e como Geometrias fractais são utilizadas na construção de antenas. No capítulo 4, são expostos a metodologia utilizada neste projeto, os resultados de simulações e medições realizadas em protótipos. No capítulo 5, tem-se as considerações finais, trabalhos futuros e artigos publicados.

2 ANTENAS

Antenas são dispositivos para irradiação ou recepção de ondas de rádio (IEEE, 1969), (IEEE, 1983). Têm sido objetos de pesquisa nos últimos anos desde James Clerk Maxwell, que unificou a teoria de eletricidade e magnetismo e representou suas relações através de um conjunto de equações, conhecidas como equações de Maxwell. No ano de 1886, Heinrich Rudolph Hertz, conseguiu demonstrar o primeiro sistema sem fio, em que, através de um dipolo de meio comprimento de onda, um sinal foi enviado a uma espira próxima. Em 1901 o primeiro sinal a longa distância (transatlântico) foi enviado, por Guglielmo Marconi, da cidade Poldhu na Inglaterra a Newfoundland, no Canadá. A antena transmissora de Guglielmo possuía 50 fios verticais em forma de leque, conectados à terra por um transmissor, que era sustentado à terra por um arame horizontal entre dois postes de 60 m e, no Canadá, a antena receptora consistia de um fio de 200 m sustentado por um pipa. Este trabalho proporcionou avanços na tecnologia dos sistemas de comunicação (BALANIS, 2016), (STUTZMAN, 2012). A partir da segunda Guerra mundial, o estudos em comunicação e dispositivos de envio e recebimento de sinais se intensificaram devido a necessidade de rápida comunicação. Na década de 1980, então consolidou-se o uso de comunicações sem fio por radiofrequência. Desde então, pesquisas utilizando antenas se intensificaram ao redor do mundo (STUTZMAN, 2012). Atualmente tem-se diversos tipos de antenas, abaixo são listados alguns destes (BALANIS, 2016):

Antenas Filamentares: são antenas composta por um ou mais fios, comumente encontradas em sistemas de comunicação portáteis automóveis, navios, aviões, etc. Podem assumir diversas formas, como mostra a Figura 2.1 (BALANIS, 2016).

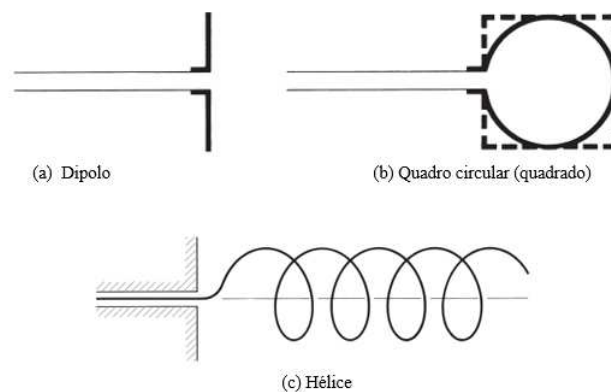


Figura 2.1 – Ilustração de antenas filamentosas (BALANIS, 2016).

Antenas de Abertura: como o nome sugere estas antenas possuem uma abertura e podem ser cobertas por materiais dielétricos para serem protegidas de condições

climáticas, sendo utilizadas em diversas aplicações, por exemplo, aeronáuticas e espaciais. Este tipo de antena pode ser fabricada com diferentes geometrias, os formatos mais populares são mostrados na Figura 2.2 (BALANIS, 2016).

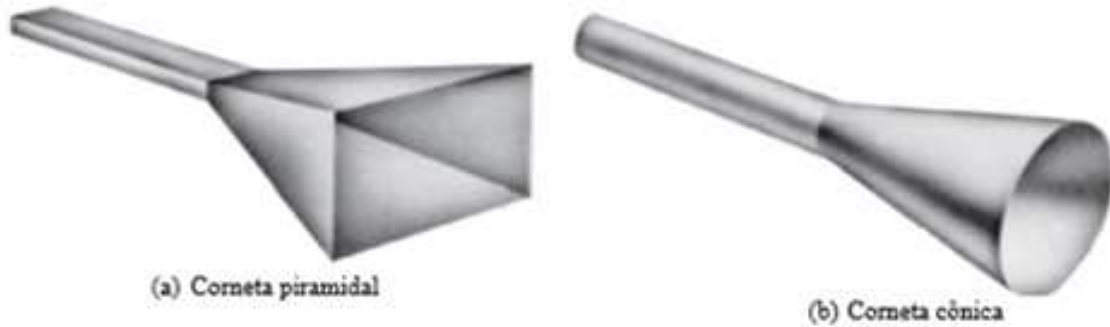


Figura 2.2 – Configurações de antenas de abertura (BALANIS, 2016).

Antenas de Microfita (*microstrip*): são compostas por uma plaqueta condutora – irradiadora (*patch*) separada de um plano de terra por um substrato. A Figura 2.3 ilustra um exemplo de antena de microfita no formato retangular, no entanto, esta plaqueta pode assumir diferentes formas geométricas, as mais utilizadas são de formato retangular, circular e triangular. Várias aplicações possuem características de radiação que não podem ser supridas por uma única antena, neste caso é possível fazer um arranjo elétrico e geométrico (conhecido como conjunto) com várias antenas e assim obter as características de radiação desejada (BALANIS, 2016).

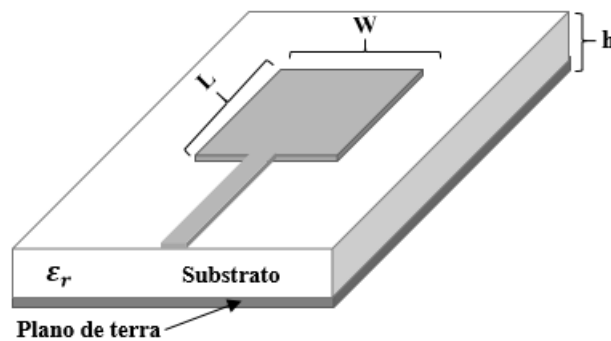


Figura 2.3 – Exemplo de antena de microfita – *patch* (Fonte: Autor).

2.1 PARÂMETROS FUNDAMENTAIS

Os parâmetros fundamentais caracterizam o desempenho de uma antena. Destes, destacam-se o diagrama de irradiação, diretividade, relação frente-costas, largura de feixe de meia potência, ganho e a largura de banda. Tais parâmetros são conceituados a seguir.

2.1.1 DIAGRAMA DE IRRADIAÇÃO

O diagrama de irradiação representa graficamente (ou em uma função) o comportamento de uma antena com relação à sua irradiação, geralmente é representado na região de campo distante e pode descrever o campo magnético ou campo elétrico (STUTZMAN, 2012), (BALANIS, 2016). A irradiação de uma antena não se distribui de modo isotrópico, ou seja, não irradia igualmente em todas as direções, a maior intensidade de irradiação depende da direção considerada (θ , ϕ). A região de campo distante (também conhecida como região de Fraunhofer) “é definida como a região de campo de uma antena onde a distribuição angular dos campos independe da distância da antena” (BALANIS, 2016). Sendo D a dimensão máxima, a região de campo distante se dará em distâncias acima de $\frac{2D^2}{\lambda}$ da antena, onde λ é o comprimento de onda. Pode-se também classificar as antenas quanto suas radiações ou quanto à “forma” de seus diagramas de radiação. Deste modo, são apresentados abaixo tipos de diagramas de irradiação (STUTZMAN, 2012), (BALANIS, 2016):

Isotrópico: é o diagrama de uma antena hipotética que irradia igualmente em todas as direções, sem perdas, considerada antena ideal. No entanto, fisicamente este tipo de antena não existe, normalmente serve como referência em estudos de outras antenas (STUTZMAN, 2012), (BALANIS, 2016). Por irradiar igualmente em todas as direções o diagrama de irradiação de uma antena isotrópica tem formato circular em 2D (Figura 2.4) ou uma esfera em 3D.

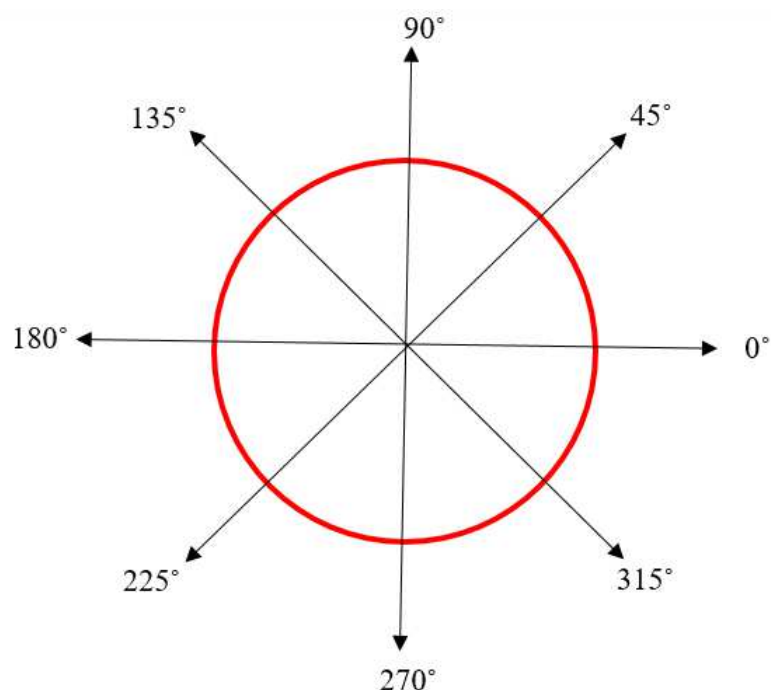


Figura 2.4 – Representação 2D do diagrama de irradiação de uma antena isotrópica (Fonte: Autor).

Direcional: diagrama que focaliza a energia de radiofrequência em uma determinada direção, ou seja, tem a propriedade de irradiar com mais eficiência em uma determinada direção que em outras, como pode ser observado na Figura 2.5 (STUTZMAN, 2012), (BALANIS, 2016).

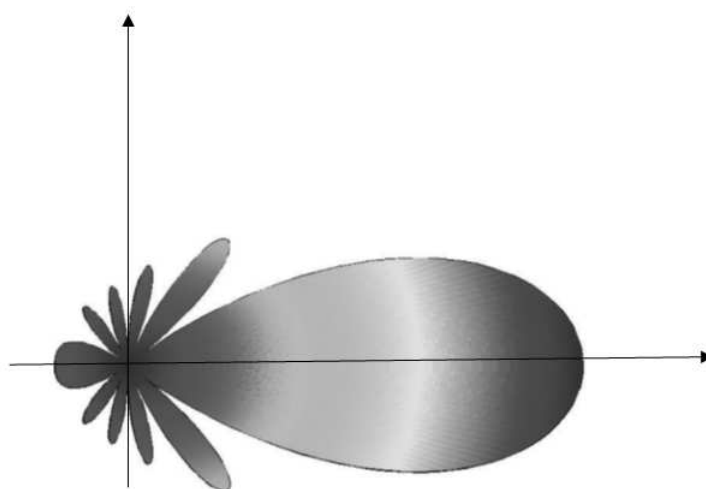


Figura 2.5 – Representação de diagrama de irradiação direcional (Fonte: Autor).

Omnidirecional: é o diagrama de antenas que possuem diagrama direcional em um plano e diagrama não-direcional em quaisquer outros planos ortogonais a este

(STUTZMAN, 2012), (BALANIS, 2016). A Figura 2.6 ilustra o diagrama de irradiação omnidirecional, tendo o plano E (ou campo elétrico - θ) com diagrama direcional e o plano H (campo Magnético - ϕ) com diagrama não-direcional.

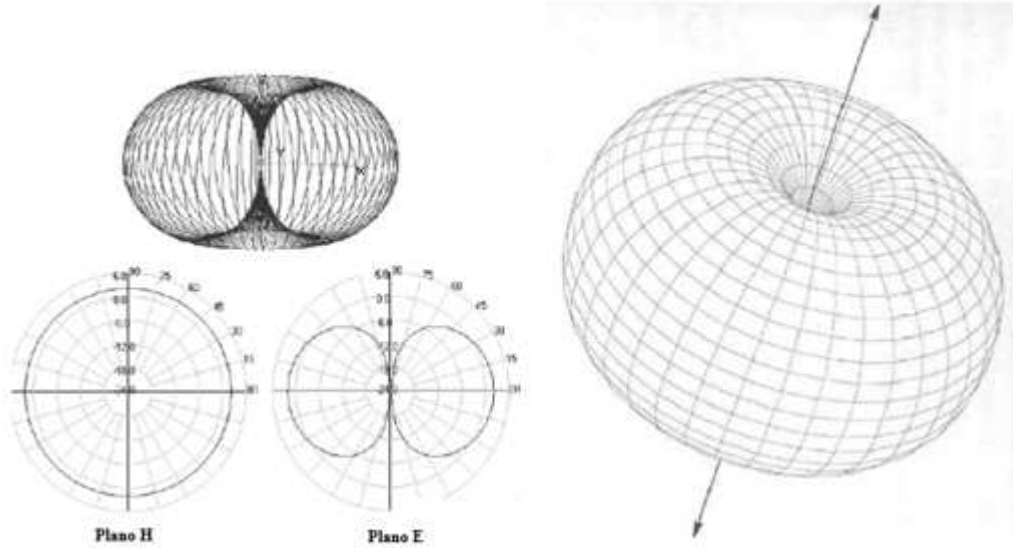


Figura 2.6 – Representação do diagrama de irradiação dos planos H e E de uma antena omnidirecional (LONDOÑO, 2009).

2.1.2 LARGURA DE FEIXE DE MEIA POTÊNCIA

A largura de feixe é medida através da separação angular entre dois pontos idênticos no lóbulo principal de um diagrama de irradiação, em que largura entre estes pontos é igual à metade do valor máximo do feixe, como ilustra a Figura 2.7. Em outras palavras, a largura de feixe de meia potência, ou HPBW (*Half Power Beamwidth*), indica no diagrama de irradiação onde a intensidade de irradiação é metade do valor máximo, o equivalente à potência máxima de irradiação menos 3 dB (BALANIS, 2016).

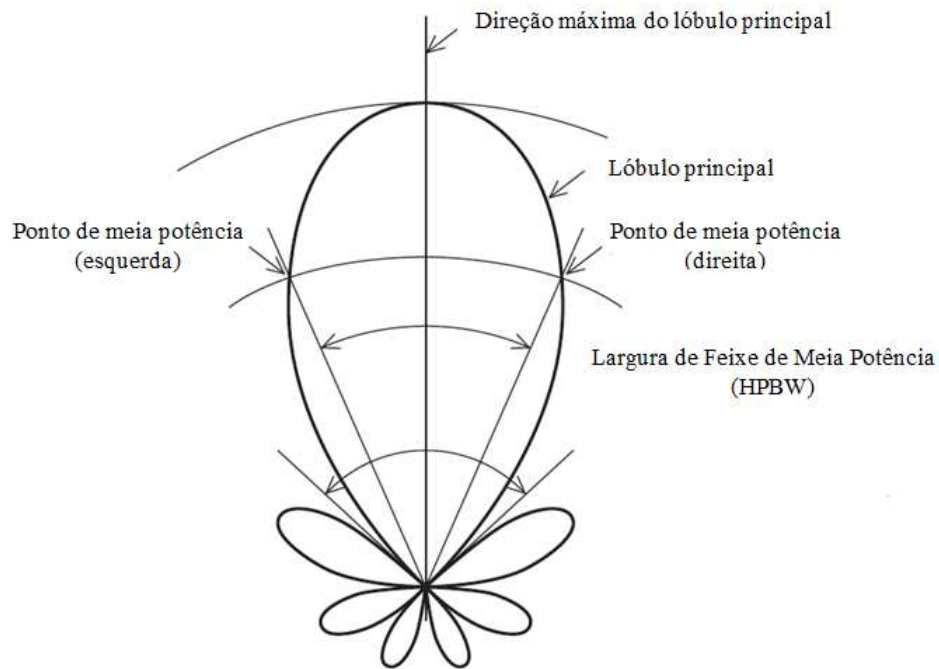


Figura 2.7 – Ilustração do *HPBW* (STUTZMAN, 2012).

2.1.3 RELAÇÃO FRENTE - COSTAS

A relação frente-costa é a razão entre o pico do feixe principal e o valor que está à 180° de distância deste, ou seja, esta relação calcula o ganho entre o lóbulo principal (que tem maior concentração de energia eletromagnética) e o lóbulo de costas (Figura 2.8), (STUTZMAN, 2012).

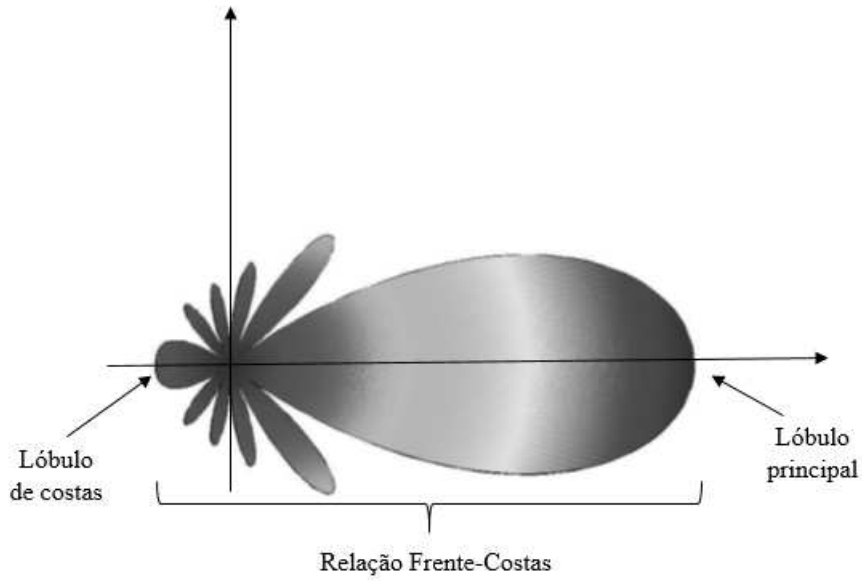


Figura 2.8 – Relação frente-costas (Fonte: Autor).

2.1.4 DIRETIVIDADE E GANHO

A diretividade de uma antena descreve quão bem um elemento irradiador direciona energia em uma dada direção. Em outras palavras, a diretividade é a medida da “focalização” (ou direção) do lóbulo principal do diagrama de irradiação e indica a capacidade de irradiação de uma antena em determinada direção. A diretividade também pode ser entendida como a razão entre a quantidade de potência que uma antena não-isotrópica emite em determinada direção e a intensidade de irradiação de uma fonte isotrópica (STUTZMAN, 2012) (BALANIS, 2016).

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}}, \quad (2.1)$$

$$D_{max} = D_0 = \frac{U|_{max}}{U_0} = \frac{U_{max}}{U_0} = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}}, \quad (2.2)$$

onde D é a diretividade (adimensional), D_0 é a diretividade máxima, U é a intensidade de radiação ($W/\text{unidade de ângulo sólido}$), a intensidade máxima de radiação é representada por U_{max} , a intensidade de irradiação em uma fonte isotrópica é representada por U_0 e por fim P_{rad} é o total de potência radiada (W). As Figuras 2.9 e 2.10 representam diagramas de diretividade de um dipolo (BALANIS, 2016).

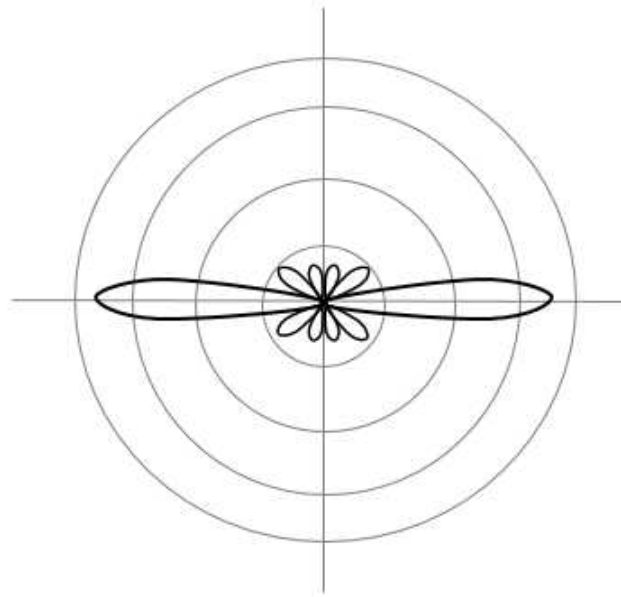


Figura 2.9 – Diagrama de diretividade em duas dimensões de um dipolo (Fonte: Autor).

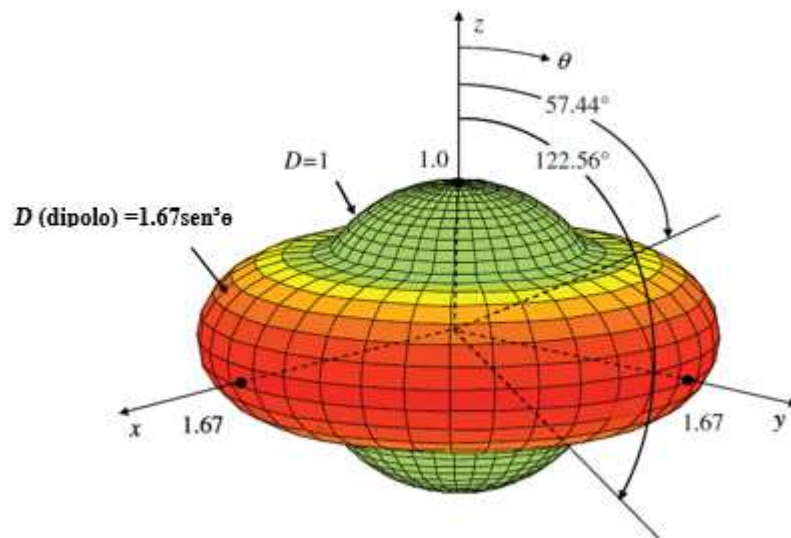


Figura 2.10 – Diagrama de diretividade em três dimensões de um dipolo de $\lambda/2$ (BALANIS, 2016).

Na Figura 2.10, vê-se dois diagramas de irradiação juntos, o de uma antena isotrópica, representada por uma esfera verde no centro, e o diagrama do dipolo representado pela região de cores vermelhas, o dipolo tem maior diretividade (maior concentração de intensidade) que a fonte isotrópica. Fora desse intervalo, o radiador isotrópico tem maior diretividade (irradiação mais intensa). A diretividade máxima do dipolo (em relação ao radiador isotrópico) ocorre quando $\theta = \frac{\pi}{2}$. Como mencionado na secção anterior, uma antena isotrópica, irradia igualmente em todas as direções, tendo, neste caso, diretividade

unitária. A fonte isotrópica serve como referência para o estudo da diretividade de quaisquer outras antenas, em que a diretividade máxima tem que ser sempre maior que a unidade e indicará as propriedades diretivas destas antenas, comparadas com a de uma fonte isotrópica. Os valores da diretividade serão maiores ou iguais a zero e menores ou iguais aos da diretividade máxima ($0 < D < D_0$) (BALANIS, 2016).

O ganho é a capacidade de uma antena irradiar com mais intensidade em determinada direção (concentrar maior quantidade de potência nesta direção) comparada a uma antena de referência, geralmente uma fonte isotrópica sem perdas, neste caso a potência de entrada usada nas duas antenas deve ser a mesma. Deste modo, o ganho leva em consideração tanto a eficiência da antena, quanto suas propriedades direcionais (BALANIS, 2016).

$$Ganho = 4\pi \frac{\text{intensidade de irradiação}}{\text{Potência total de entrada (aceita)}} = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in}} (\text{adimensional}), \quad (2.3)$$

a potência total irradiada está relacionada à potência de entrada da seguinte forma:

$$P_{rad} = e_{cd} P_{in}, \quad (2.4)$$

em que e_{cd} é a eficiência de irradiação da antena, ou seja, o quanto a antena irradia levando em consideração as perdas da antena, sejam perdas por descasamento, ou perdas por condutores e dielétricos (BALANIS, 2016).

2.1.5 IMPEDÂNCIA DE ENTRADA E LARGURA DE BANDA

Impedância é a razão entre corrente e tensão entre dois terminais. Fatores como frequência do sinal, materiais constitutivos, proximidade com condutores entre outros, determinam a frequência de entrada da antena. A impedância de entrada é aquela existente nos terminais de entrada de uma antena e é definida por (BALANIS, 2016):

$$Z_A = R_A + jX_A, \quad (2.5)$$

em que R_A é a parte real e X_A parte imaginária (complexa) é a reatância. A perda da impedância (Z_A) é formada por duas componentes: perda ôhmica (R_L) e a perda de irradiação (R_r) ou resistência de irradiação da antena (BALANIS, 2016).

$$R_A = R_L + R_r. \quad (2.6)$$

A máxima transferência de potência acontece quando a impedância da antena não apresenta a parte da componente reativa e sua componente resistiva é igual à componente resistiva da linha de transmissão, ou seja, a antena e a linha têm a mesma potência,

isto é chamado de casamento de impedâncias. Não há casamento de impedâncias total entre a linha de transmissão e a antena, ou seja, parte da potência da antena é refletida para o transmissor, gerando uma onda estacionária, podendo ser minimizada através de técnicas de casamento de impedâncias. O objetivo é ter o valor o mais próximo possível entre a impedância de entrada da antena e a impedância característica da linha de transmissão (STUTZMAN, 2012). Quando não há casamento de impedâncias tem-se um coeficiente de reflexão (Γ) que possibilita calcular o coeficiente de tensão de onda estacionária (*Voltage Standing Wave Ratio* – VSWR). De modo geral é adotado $VSWR \leq 2$, o que caracteriza a largura de banda e garante que pelo menos 90% da potência de entrega será irradiado (BALANIS, 2016). A impedância de uma antena e o casamento de impedâncias entre a antena e a linha de transmissão, variam com a frequência. Deste modo, a antena irá operar em uma banda limitada de frequência, que é chamada largura de banda (*Bandwidth* - *BW*) (BALANIS, 2016). A frequência de melhor casamento das impedâncias apresenta maior perda de retorno, ou menor coeficiente de reflexão, e é chamada de frequência de ressonância (f_0).

A largura de banda é a faixa de frequências em que os parâmetros da antena têm desempenho de acordo com um padrão especificado (BALANIS, 2016). A largura de banda é calculada por $BW = f_2 - f_1$, em que f_2 é a frequência superior e f_1 a frequência inferior. A frequência central é calculada por $f_0 = (f_1 + f_2)/2$. A largura de banda, também chamada de banda passante da perda de retorno (*Return Loss* - RL), em função da frequência de uma antena é obtida por BW em -10 dB.

$$RL(dB) = 20 \log\left(\frac{VSWR + 1}{VSWR - 1}\right) \quad (2.7)$$

Normalmente a largura de banda é apresentada por porcentagem ao invés de frequência absoluta (STUTZMAN, 2012). A largura de banda em porcentagem ($BW_{\%}$) é obtida pela Expressão 2.8

$$BW_{\%} = \frac{BW}{f_0} \times 100 = 2 \frac{f_2 - f_1}{f_1 + f_2} \times 100. \quad [\%] \quad (2.8)$$

2.2 ANTENAS DE MICROFITA

As primeiras ideias de antenas de microfita apareceram na década de 1950, porém, somente na década de 1970 pesquisas com este tipo de antena se intensificaram, surgindo assim, em 1981 a primeira publicação de antena de microfita e a partir da década de 1990 estas antenas passaram a ser utilizada em sistemas comerciais (BALANIS, 2016), (STUTZMAN, 2012).

Diversos materiais podem ser usados como substrato no projeto de antenas microfita. Em geral, a constante dielétrica desses materiais tem valores $2,2 \leq \epsilon_r \leq 12$.

Materiais com constantes baixas têm melhor eficiência, largura de banda maior e campos mais desprendidos, o que facilita a radiação no espaço. Substratos com valores de constantes dielétricas mais altos, normalmente são utilizados em circuitos de micro-ondas que exigem campos mais confinados para minimizar a irradiação e acoplamento indesejáveis, no entanto, tais substratos têm perdas maiores, tornando-se menos eficiente e resultam em largura de banda menores (BALANIS, 2016).

A plaqueta irradiante, também chamada de *patch*, pode assumir diversas formas geométricas, por exemplo: retângulos, triângulos, círculos, podendo, também, apresentar modelos mais complexos, como, geometrias fractais ou bioinspiradas em animais ou plantas, como mostra a Figura 2.11 (SILVA JUNIOR et al., 2018).

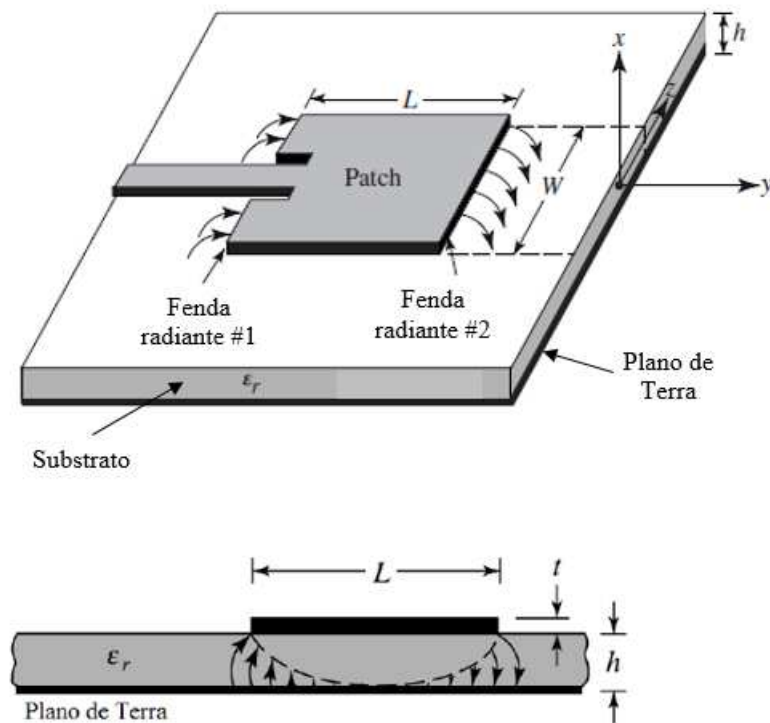


Figura 2.11 – Representação de uma antena de microfita quadrada (BALANIS, 2016).

Antenas *patch* apresentam como vantagens baixo custo, facilidade em construção, dimensões reduzidas, estrutura leve, possibilita a integração direta com equipamentos de comunicações e a impressão em substratos flexíveis permite que este tipo de antena seja utilizada em diversas aplicações, por exemplo: monitoramento contínuo e registro de sinais vitais de pacientes que sofrem de doenças crônicas (como diabetes); esporte ou segurança são outras áreas que utilizam estas antenas (KHALEEL, 2014). Assim como quaisquer dispositivos eletrônicos, antenas de microfita apresentam algumas limitações que precisam ser levadas em consideração ao serem utilizadas, por exemplo: baixa eficiência de irradiação (caso sejam empregados substratos com constantes dielétricas elevadas), possibilidade de

excitação por ondas de superfícies e baixo ganho (BALANIS, 2016). Há diversas formas de alimentação e análise de uma antena de microfita, a seguir tem-se melhores explicações sobre estes dois pontos.

2.2.1 MÉTODOS DE ALIMENTAÇÃO

Alguns tipos de estruturas podem ser utilizadas para alimentar antenas de microfita, as mais comuns são: linha de transmissão, cabo coaxial, acoplamento por abertura e acoplamento por proximidade.

2.2.1.1 LINHA DE MICROFITA

Este método de alimentação utiliza uma fita condutora, normalmente com largura muito inferior à da plaqueta. A linha de microfita (Figura 2.12) pode ser fabricada facilmente, possui casamento de impedância simples, porém à medida que o substrato aumenta, ondas de superfície e irradiação espúria, geradas pela alimentação aumentam, o que limita a largura de banda (BALANIS, 2016).

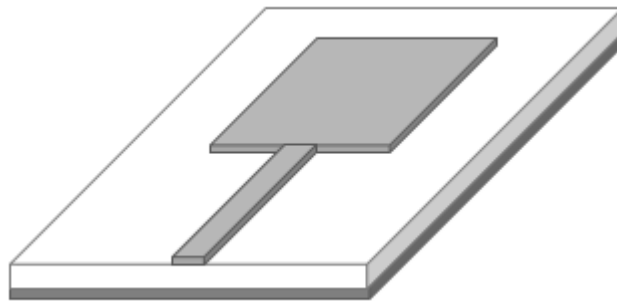


Figura 2.12 – Ilustração do método de alimentação por linha de transmissão (Fonte: Autor).

2.2.1.2 CABO COAXIAL

Neste método de alimentação o condutor interno do cabo coaxial é conectado à plaqueta irradiadora e o condutor externo é interligado ao plano de terra. Possui fácil casamento de impedância e fácil construção, além de apresentar baixa irradiação espúria. Porém, possui baixa largura de banda e tem modelagem difícil (Figura 2.13) (BALANIS, 2016).

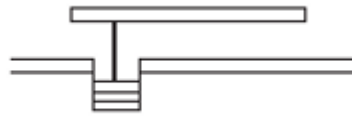


Figura 2.13 – Imagem ilustrativa do método de alimentação por cabo coaxial (STUTZMAN, 2012).

2.2.1.3 ACOPLAMENTO POR ABERTURA

O método de alimentação por abertura consiste em dois substratos separados por um plano de terra; abaixo do substrato inferior tem-se uma linha de microfita em que a energia alcança a plaqueta por meio de uma fenda no plano de terra que separa os substratos, como ilustra a Figura 2.14. Geralmente, o material do substrato inferior possui constante dielétrica alta; o material do substrato superior, pelo contrário, possui constante dielétrica com valor baixo. Este tipo de alimentação tem modelagem simples, o casamento de impedâncias faz-se através do controle da largura da linha de alimentação e com o comprimento da fenda. No entanto, é considerado o modelo de alimentação com fabricação mais difícil dentre os quatro e possui banda estreita (BALANIS, 2016), (STUTZMAN, 2012).

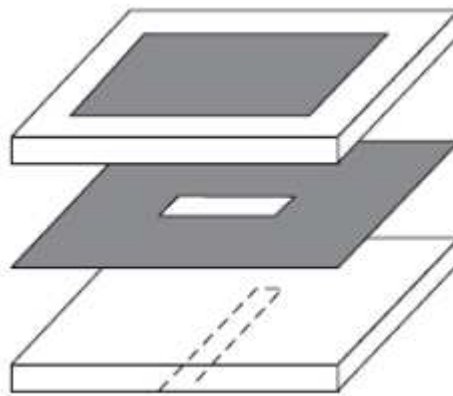


Figura 2.14 – Método de alimentação por acoplamento por abertura (Fonte: Autor).

2.2.1.4 ACOPLAMENTO POR PROXIMIDADE

A alimentação por proximidade consiste em uma linha de alimentação posicionada entre duas camadas de substrato, a plaqueta irradiadora é colocada sobre o substrato superior e o plano de terra colocado abaixo do substrato inferior, como ilustra a Figura 2.15. Este tipo de alimentação possibilita maiores larguras de banda (até 13%), menor irradiação espúria e tem modelagem relativamente simples, porém sua fabricação é difícil.

O casamento de impedância pode ser realizado através do comprimento do estube de alimentação e a razão entre as larguras da plaqueta e da linha (BALANIS, 2016).

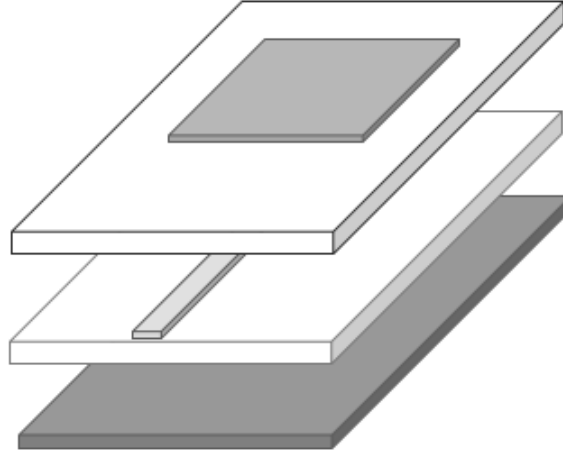


Figura 2.15 – Método de alimentação por acoplamento por proximidade (Fonte: Autor).

2.2.2 MÉTODOS DE ANÁLISE

Na fabricação de antenas é necessário que primeiramente seja feita modelagem das estruturas e posteriormente que os parâmetros destes modelos sejam analisados numericamente. Deste modo, diversos métodos de análises foram desenvolvidos logo nos primeiros anos de estudo em antenas de microfita (STUTZMAN, 2012). Os métodos de análises mais conhecidos são os de linha de transmissão e o de cavidade, mostrados abaixo.

2.2.2.1 LINHA DE TRANSMISSÃO

O método de análise por linha de transmissão é o mais simples e trata a plaqueta como uma linha de transmissão ressoante, como pode ser visto na Figura 2.16. Este modelo é unidimensional e assume campos uniformes na direção y no irradiador, tratando o mesmo como duas fendas (*slots*) irradiantes e paralelas, cada uma com uma entrada paralela equivalente separadas por uma linha de transmissão de impedância Z_c e comprimento L . Efeitos de borda, conhecidos como franjamento, acontecem devido à plaqueta possuir dimensões finitas em largura e comprimento. A quantidade de franjamento para o plano $E(x - y)$ é a razão entre o comprimento (L) da antena e a espessura (H) do substrato, L/H , e constante dielétrica ϵ_r do substrato. Considera-se que a linha de microfita está entre dois dielétricos, pois parte das ondas se deslocam através do substrato e outras pelo ar. Assim, é introduzida uma constante dielétrica efetiva (ϵ_{ref}) que leva em consideração as constantes dielétricas do ar e do substrato utilizado na antena (BALANIS, 2016) Stutzman (2012) .

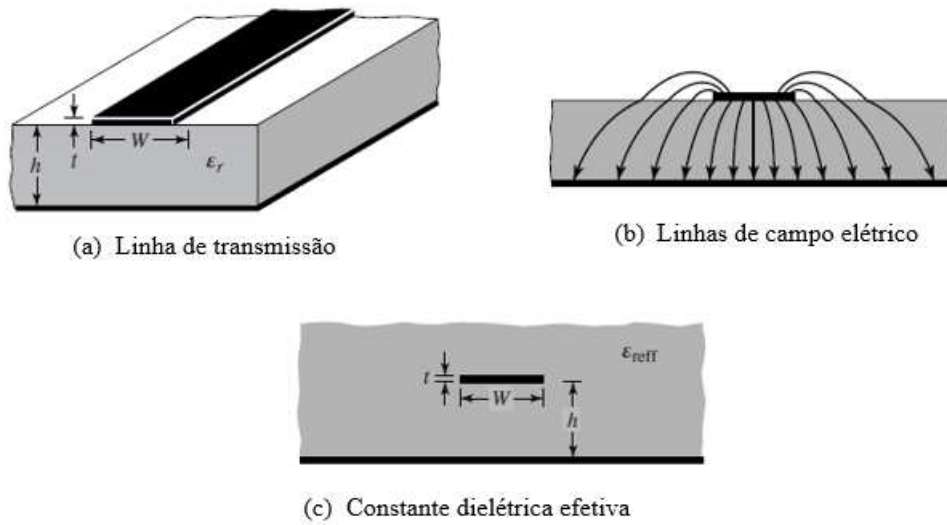


Figura 2.16 – Método de Análise por Linha de Transmissão (BALANIS, 2016).

2.2.2.2 CAVIDADE

O método de análise por cavidade trata a região do substrato da antena de microfita como sendo uma cavidade, em que suas bordas laterais são tratadas como paredes magnéticas e tendo suas partes superior e inferior condutoras, ou seja, limitada pela antena e pelo plano de terra, como mostra a Figura 2.17. O modelo de cavidade não se limita a variações unidimensionais, como é o caso do modelo de linha de transmissão, este modelo inclui todas as variações de campo internas da plaqueta através de uma soma de campos modais (STUTZMAN, 2012).

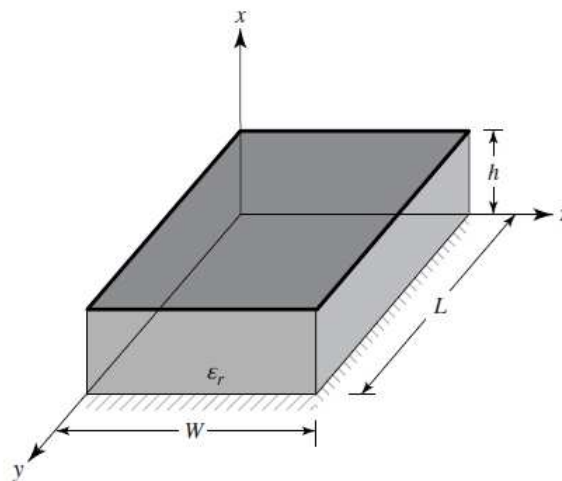


Figura 2.17 – Geometria de uma antena de microfita retangular (BALANIS, 2016).

2.3 ANTENAS FLEXÍVEIS

Pesquisas em tecnologia têm sido realizadas em inúmeras áreas de conhecimento nas últimas décadas, a comunicação tem ganhado destaque com estudos e desenvolvimento de dispositivos eletrônicos, antenas, miniaturização de equipamentos, dentre outros, devido à grande necessidade de envio e recebimento de informações em tempo real (STUTZMAN, 2012). Redes pessoais sem fio (WPAN) permitem que dispositivos eletrônicos se conectem a uma curta distância (normalmente menos de 10 metros). Vários tipos de tecnologias podem ser utilizadas para formar uma WPAN, como Bluetooth, Zigbee, UWB, HomeRF (HU; XIA; SHEN, 2007). Uma especialidade das WPAN são as redes sem fio junto ao corpo (WBAN), definidas como sensores sem fio ligados ao copo humano ou próximos a este (SILVA JUNIOR et al., 2018). A principal função deste tipo de rede é sensoriar ou monitorar mudanças no ambiente ao seu redor, fazendo coleta e processamento de dados, podendo tomar decisões automáticas, fazer recomendações ou apenas fornecer algum tipo de informação para o usuário (EL-BENDARY, 2015).

Dispositivos de sensoriamento e envio de informações usados próximos ao corpo são conhecidos como tecnologias vestíveis (*Wearable Technology*), podendo ser utilizado como acessório ou como parte de roupas. Aplicações com sistemas sem fio vestíveis podem ser encontradas em inúmeras áreas como, saúde, esporte, militar, entretenimento, aeronáutica, etc. Os dispositivos eletrônicos vestíveis apresentam alguns requisitos necessários para serem utilizados junto ao corpo, deste modo, precisam ser leves, dobráveis, portáteis, flexíveis, além de baixo impacto visual, ou seja, é necessário ter pequenas dimensões, baixo custo e facilidade de integração às roupas ou acessórios em que serão aplicados, além de integração com antenas que operem em bandas específicas, para realizar a comunicação sem fio. Assim, antenas utilizadas em dispositivos vestíveis precisam ser flexíveis e, também, são conhecidas como antenas vestíveis (EL-BENDARY, 2015), (KHALEEL, 2014).

Tecnologias vestíveis por apresentarem vantagens de ser energeticamente eficiente, ter baixo custo de fabricação, serem leves, possuírem baixa complexidade de fabricação e ampla disponibilidade de substratos flexíveis, têm se mostrado melhor alternativa em comparação aos dispositivos eletrônicos convencionais que utilizam substratos rígidos (SILVA JUNIOR, 2015). Desta forma, tecidos são exemplos de bons candidatos a substratos ou condutores em antenas vestíveis, neste caso, também chamadas de antenas têxteis - para aplicações que exigem integração com roupa (KHALEEL, 2014).



a)



b)

Figura 2.18 – a) Antena *patch* têxtil em formato de anel colada em substrato jeans (CHOWDHURY, 2012); Antena *patch* quadrada também colada em substrato em jeans (SHAVIT, 2017).

Há uma variedade de técnicas utilizadas para confeccionar antenas flexíveis, por exemplo: bordado, em que a antena e o plano de terra são bordados com linhas feitas de materiais condutores em uma superfície flexível; tem-se as técnicas de pintura e impressão, que utilizam tintas feitas com materiais condutores para pintar ou imprimir a antena e o

plano de terra sobre o material dielétrico flexível; e tem-se a colagem (Figura 2.18), em que o elemento irradiante e o plano de terra são desenhados em uma lâmina condutora e em seguida cortado e colado sobre o dielétrico (SILVA JUNIOR, 2015). Várias pesquisas têm sido realizadas utilizando materiais flexíveis no desenvolvimento de antenas vestíveis com aplicações em diversas faixas de frequências, como pode ser visto em: Silva Junior et al. (2018) onde antenas inspiradas em formas de plantas foram desenvolvidas em poliamida e operando em protocolos de telefonia celular móvel (2G, 3G e 4G) e rede local sem fio (2,4 e 5 GHz); outro exemplo pode ser encontrado no trabalho de Parui (2018) que desenvolveu uma antena para banda UWB utilizando *jeans* como substrato e operando na faixa de frequência de 1-6,58 GHz; Kavitha e Swaminathan (2018) desenvolveram antenas do tipo monopolo utilizando *jeans*, algodão, FR4 e teflon como substratos, para operar em bandas industriais, científicas e médicas de 2,45 GHz.

2.4 FREQUÊNCIAS ULTRA-ALTAS

As ondas de radiofrequência são divididas de acordo com seus valores e/ou seus comprimentos de onda. Uma onda eletromagnética é identificada por sua frequência de oscilação f , já o seu período é definido por $T = 1/f$, e seu comprimento de onda é designado por λ , a relação entre f e λ é demonstrado na Expressão 2.9 (PARET, 2009):

$$\lambda = cT = \frac{c}{f} \quad (2.9)$$

onde c é a velocidade da luz, isto é, a velocidade de propagação da luz no vácuo (ou no ar), λ está em metros e f está em hertz (PARET, 2009), desta forma

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{f} \quad (2.10)$$

A International Telecommunication Union (ITU) é responsável pelas definições sobre o uso do Espectro de Eletromagnético para sistemas de telecomunicações no mundo inteiro. O ITU divide o planeta em três regiões para administrar o espectro eletromagnético de radiofrequência. O Brasil, assim como as Américas encontram-se na Região 2. A seguinte tabela demonstra como as ondas eletromagnéticas são classificadas no Brasil de acordo com a ANATEL (2018).

Tabela 2.1 – Nomeclatura das faixas de frequências (ANATEL, 2018)

Número da Faixa	Símbolo	Faixa de Frequência (excluindo o limite baixo e incluindo o li- mite alto)	Subdivisão Métrica correspondente
4	VLF	3 à 30 kHz	Ondas Milimétricas
5	LF	30 à 300 kHz	Ondas Quilométricas
6	MF	300 à 3000 kHz	Ondas Hectométricas
7	HF	3 à 30 MHz	Ondas Decamétricas
8	VHF	30 à 300 MHz	Ondas Métricas
9	UHF	300 à 3000 MHz	Ondas Decimétricas
10	SHF	3 à 30 GHz	Ondas Centimétricas
11	EHF	30 à 300 GHz	Ondas Milimétricas
12		300 à 3000 GHz	Ondas Decimilimétricas

A banda de Frequências Ultra-altas (Ultrahigh Frequency - UHF) tem sido utilizada em pesquisas para os mais diversos fins, por exemplo, Wang e Li (2017) desenvolveram um sensor para uma antena com Fractal de Moore para Frequências Ultra-altas, tal dispositivo será utilizado para detecção de descargas parciais (PD) em subestações isoladas a gás, já que descobriu-se que pulso de corrente gerado pelo PD pode ter uma borda ascendente muito rápida e estimula os sinais eletromagnéticos na faixa de frequência ultra alta (UHF, 0,3 – 3,0 GHz). Kumar (2016) desenvolveu uma pequena antena com *slots* simétricos para ser utilizados em dispositivos RFID funcionando em frequências Ultra-altas. Estes *slots* ajudaram a obter uma antena de tamanho pequeno para dispositivos de leitor portátil de RFID UHF. A cobertura geral da largura de banda da antena proposta é de 21 MHz (920,9 MHz - 941,1 MHz) e possui tamanho total de 56 x 56 x 1,6 mm³. Uma antena de microfitas compacta foi desenvolvida por Bong e Chung (2018) para o *design* de etiquetas RFID meta-montáveis em UHF, a etiqueta proposta é legível a uma distância de 8 m do leitor e possui frequência ressonante bastante estável. Uma outra antena microfita, também, para ser usada como *tag* RFID em UHF, foi proposta por Lim e Bong (2018) em que dois slots paralelos são introduzidos na plaqueta irradiadora para aumentar seu comprimento elétrico, fazendo com que esta antena tenha tamanho pequeno de 35 x 35 x 1,6 mm³ e o alcance máximo de leitura de 9,5 m na frequência ressonante de 915 MHz.

Neste capítulo foram apresentados os tipos de antenas, seus parâmetros fundamentais, principais características, métodos de alimentação e métodos de análise de antenas de microfita. Assim como, também foi falado sobre antenas flexíveis e Frequências Ultra-altas. O próximo capítulo irá abordar os conceitos das Geometrias fractais e suas características.

3 GEOMETRIA FRACTAL

Muitos matemáticos focaram seus estudos em conjuntos e funções em que métodos clássicos de cálculo pudessem ser aplicados. Em contrapartida, conjuntos e funções não tradicionais (não-suaves ou não regulares) eram vistos apenas como acontecimentos individuais e não como um conjunto, então eram desprezadas por não serem considerados dignos de estudos (FALCONER, 2014). Em 1975, quando Mandelbrot publicou um estudo sobre geometrias da natureza, este pensamento começou a mudar. Mandelbrot (1983) deixou claro em seu trabalho que as geometrias tradicionais não poderiam representar, de fato, o que vemos na natureza. Em suas palavras:

“Por que a geometria é frequentemente descrita como ‘fria’ e ‘seca’? Um dos motivos reside na sua incapacidade de descrever a forma de uma nuvem, uma montanha, um litoral ou uma árvore. Nuvens não são esferas. montanhas não são cones, linhas costeiras não são círculos e casca de árvore não é lisa, nem relâmpagos viajam em linha reta. Em termos mais gerais, afirmo que muitos padrões da Natureza são tão irregulares e fragmentados que, em comparação com Euclides - um termo usado neste trabalho para denotar toda a geometria padrão - a Natureza exhibe não apenas um grau mais alto, mas um nível de complexidade completamente diferente. O número de escalas distintas de comprimento dos padrões naturais é infinito para todos os efeitos práticos (MANDELBROT, 1983).”

Segundo Mandelbrot (1983), Euclides e tantos matemáticos optaram em fugir de estudar a natureza, desenvolvendo teorias não relacionadas a qualquer coisa que pudessemos ver ou sentir por os considerar sem forma. Mandelbrot, por outro lado, se propôs estudar o que considerou padrões amorfos, pois compreendeu que conjuntos irregulares fornecem uma representação melhor de muitos fenômenos naturais que figuras da geometria clássica. Assim, Mandelbrot desenvolveu o que descreveu como uma nova geometria da natureza que poderia ser utilizada em diversos campos de estudo. Tal geometria seria capaz descrever diversos padrões irregulares e fragmentados na natureza que levaria a teorias completas e, possibilitando, identificar um conjunto de formas que chamou de fractais.

A palavra “fractal” advinda do latim “*fractus*” significa quebrado ou irregular, foi cunhada por Mandelbrot e utilizada em seu estudo sobre a geometria da natureza para designar objetos irregulares e que não estavam dentro dos padrões da geometria tradicional. Os fractais definidos por Mandelbrot como mais comuns dependem do acaso e suas irregularidades (neste caso, considera suas irregularidades estatísticas). Assim como, estas formas tendem a ser escaláveis (redimensionáveis), o que significa que o grau de irregularidade ou fragmentação da forma é idêntico em todas escalas (MANDELBROT, 1983).

A matemática do século XX, considerada por Mandelbrot ‘matemática moderna’ começa a partir de uma revolução de ideias que não se encaixavam na matemática clássica de Euclides e Newton, como o Conjunto de Cantor e Curva de Peano. Estas novas estruturas foram consideradas “uma galeria de monstros” ou “patologias”, tais quais o cubismo ou músicas atonais. Entretanto, Mandelbrot afirma que a geometria fractal não é uma descoberta advinda totalmente da matemática do século XX, mas um novo ramo nascido tardiamente da crise da matemática que começou quando duBois Reymond relatou pela primeira vez em 1875 uma função contínua e não diferenciada, construída por Weierstrass. Esta crise durou até 1925 e seus principais atores foram Cantor, Peano, Lebesgue, Hausdorff, Koch e Sierpinski. Os trabalhos destes estudiosos serviram de base para os estudos de Mandelbrot, por exemplo, o conceito de Hausdorff sobre dimensão é uma das principais formas de calcular a dimensão de um fractal (FALCONER, 2014), (MANDELBROT, 1983).

A natureza possui inúmeros fractais que podem ser encontrados nos mais diversos locais. Por exemplo, o litoral da Irlanda com suas várias deformações, quanto mais aproxima-se a imagem, mais deformações podem ser percebidas e sempre similares às imagens anteriores, como pode ser observado na Figura 3.1:

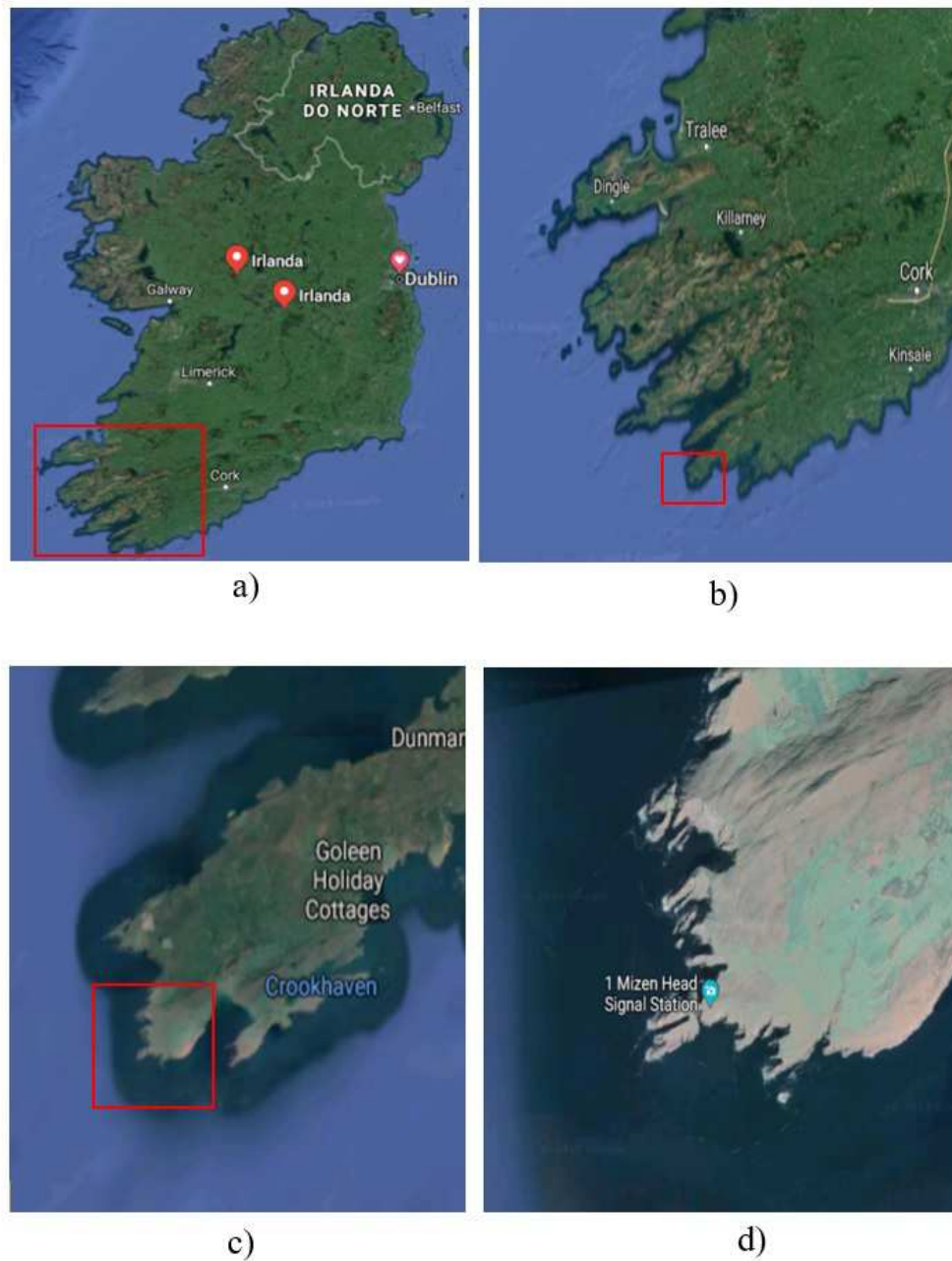


Figura 3.1 – a) Ilha da Esmeralda vista de cima com uma área ao sul selecionada; b) Sul da Ilha da Esmeralda com zoom e uma área da costa selecionada ao sul; c) Crookhaven parte selecionada na Figura 3.1b aumentada e com uma pequena parte da costa selecionada ao sul; d) Ponta da costa da Ilha da Esmeralda selecionada na Figura 3.1c com zoom (GOOGLE, 2020).

Outros exemplos de fractal na natureza são as folhas de samambaia onde seus galhos e folhas são autosimilares, como pode ser observado na Figura 3.2a. Outro exemplo é o brócolis romanesco Figura 3.2b em que seus galhos são autosimilares e à medida que se aproxima pode ser observado autosimilaridade nos galhos menores. O floco de neve também é um fractal encontrado na natureza, Figura 3.2c.



Figura 3.2 – Exemplos de fractais na natureza: a) Folhas de samambaia possuem auto-similaridade (MOTTA, 2015); b) Brócolis romanesco seus pequenos galhos em formatos pontiagudos possuem outras pontas menores similares às maiores (MOTTA, 2015); c) floco de neve, suas partes também apresentam autosimilaridade (OSÓRIO, 2010).

A partir de tantos outros exemplos como estes, Mandelbrot (1983), definiu fractais como objetos que possuem autosimilaridade em diferentes escalas. No entanto, a definição atual diz que um fractal é perfeitamente autosimilar criado por meio de processos de interação. Assim, fractais encontrados na natureza são considerados pré-fractais (*fractal-like*), por não serem perfeitamente autosimilares do ponto de vista matemático (FALCONER, 2014).

Atualmente existem muitos conjuntos ou geometrias fractais conhecidas, a seguir são apresentados alguns destes conjuntos e a partir deles expostas as principais características dos conjuntos fractais.

Conjunto do Cantor

O conjunto do terço do cantor ou apenas conjunto do cantor é o tipo de fractal mais simples de construir e possui muitas características típicas dos fractais. Tal conjunto é construído a partir de um segmento de reta de uma unidade, seguida por sequência de

operações de exclusão. Assim, você traça uma linha reta, divide em três partes iguais e, por fim, exclui a parte central, faz o mesmo nos dois pedaços restantes, divide cada um em três partes iguais exclui o pedaço central e assim sucessivamente, como demonstra a Figura 3.3 (FALCONER, 2014):

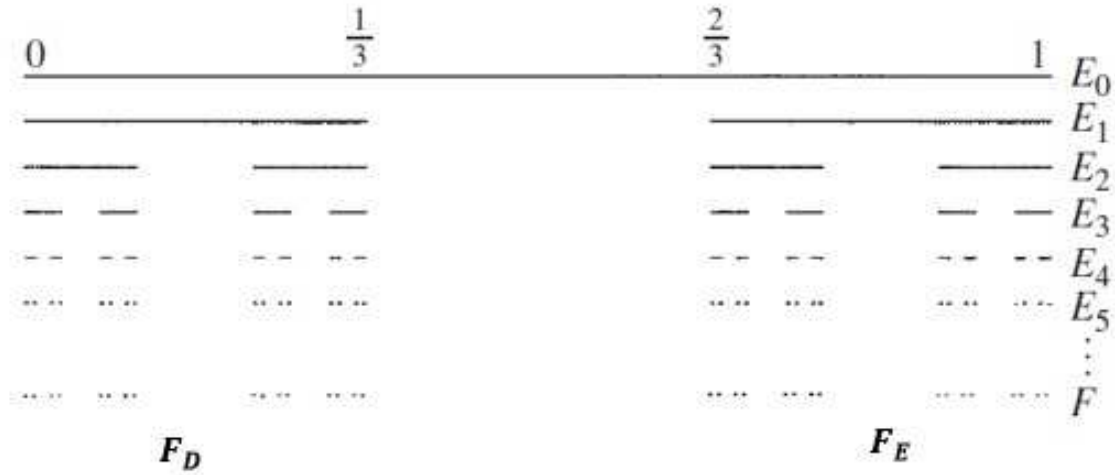


Figura 3.3 – Ilustração do conjunto do cantor (FALCONER, 2014).

Seja E_0 o intervalo $[0, 1]$ (tendo que $[a, b]$ denota o conjunto dos números reais, de modo que $a \leq x \leq b$). E_1 é o subconjunto obtido pela exclusão do terço médio de E_0 . Excluindo o terço médio dos intervalos de E_1 , obtém-se E_2 e assim por diante, onde obtemos E_k deletando o terço médio de E_{k-1} , logo E_k possui 2^k intervalos com 3^{-k} de comprimento. O conjunto do Cantor F consiste no número de E_k para todo K , matematicamente F é a intersecção $\cap_{k=0}^{\infty} E_k$ (FALCONER, 2014).

Curva de Koch

A curva de Koch é um fractal com ideia parecida com o Conjunto do Cantor. Em que se tem um segmento de linha E_0 de comprimento unitário. E_1 é formado por quatro segmentos obtidos pela remoção do terço médio de E_0 e pela substituição pelos outros dois lados do triângulo equilátero, com base no segmento removido. Construímos E_2 aplicando o mesmo procedimento a cada um dos segmentos em E_1 e assim por diante. Ou seja, o seguimento de reta é dividido em três partes iguais e o terço central é removido (assim como no Conjunto do Cator) e então são adicionados dois segmentos de reta de mesmo comprimento do que foi removido e formando um triângulo equilatero no local do terço médio que foi removido da reta, como pode ser melhor observado na Figura 3.4 (MANDELBROT, 1983).

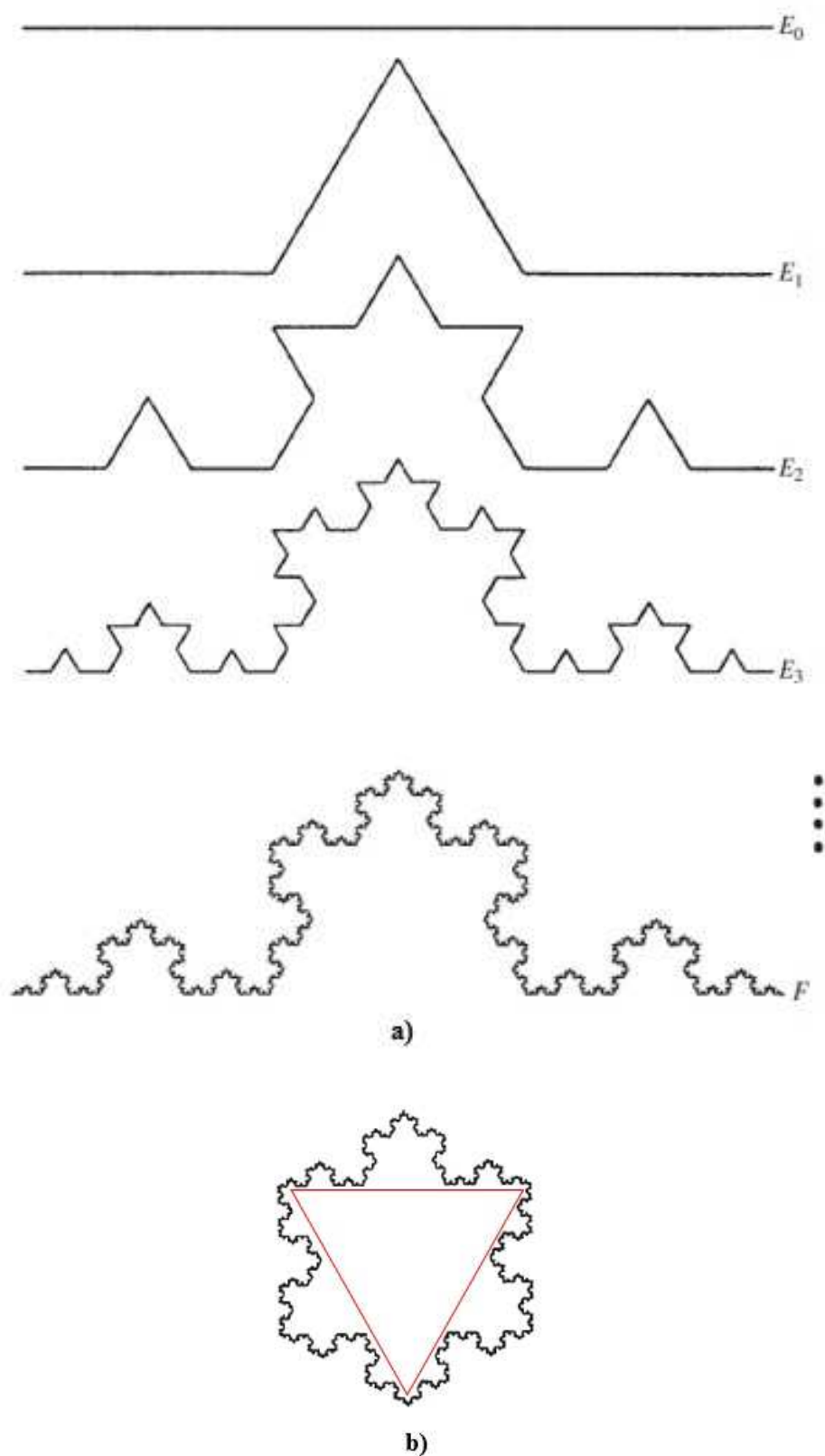


Figura 3.4 – a) Construção da curva F de von Koch. Em cada estágio, o terço médio de cada intervalo é substituído pelos outros dois lados de um triângulo equilátero; b) Três curvas de von Koch encaixadas, em forma de triângulo, para formar uma curva de floco de neve (MANDELBROT, 1983).

Assim, E_k vem da substituição do terço médio de cada segmento de linha reta de E_{k-1} pelos outros dois lados de um triângulo equilátero. Quando k é grande, as curvas E_{k-1} e E_k diferem apenas em detalhes finos e, como k tende a ser infinito, a sequência de curvas poligonais E_k se aproxima de uma curva limitadora F , chamada curva de Von Koch (MANDELBROT, 1983).

Existem também, outras variações da curva de Von Koch, um exemplo é a curva retangular que é construída com a retirada de retângulos a cada iteração, como pode ser observada na Figura 3.5 (FALCONER, 2014).

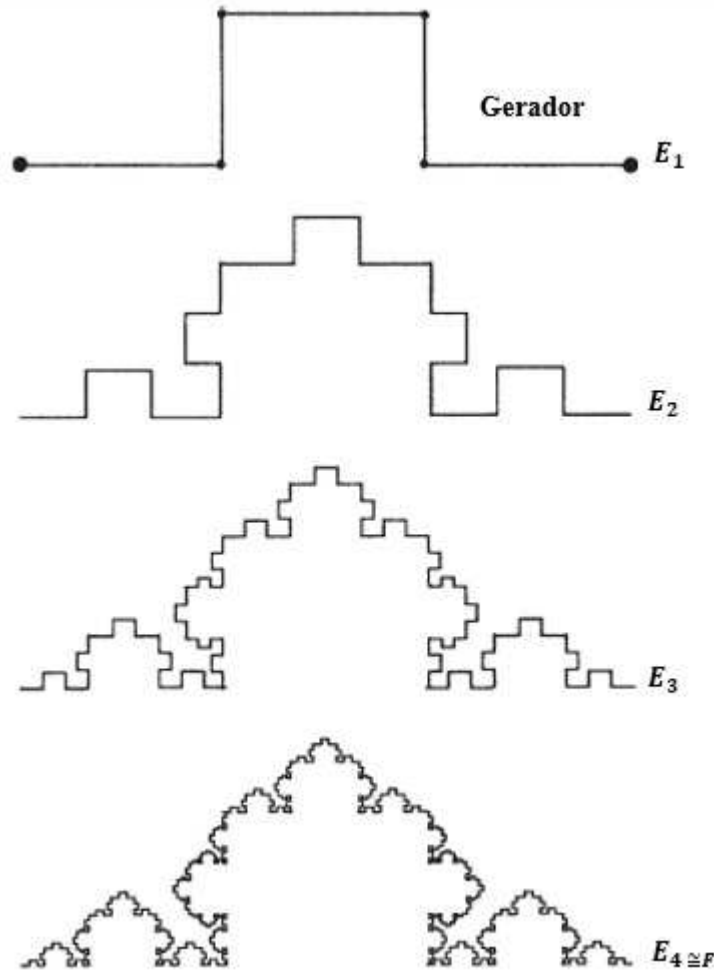


Figura 3.5 – Etapas da construção de uma curva de Koch quadrada (FALCONER, 2014).

Triângulo de Sierpinski

Assim como outras geometrias fractais, o Triângulo de Sierpinski também é construído de forma recursiva. Este conjunto, que também é conhecido como *gasket* é obtido pela remoção repetida do triângulo equilátero (invertido) que é formado a partir de um triângulo, também equilátero, de uma unidade de lado (MANDELBROT, 1983).

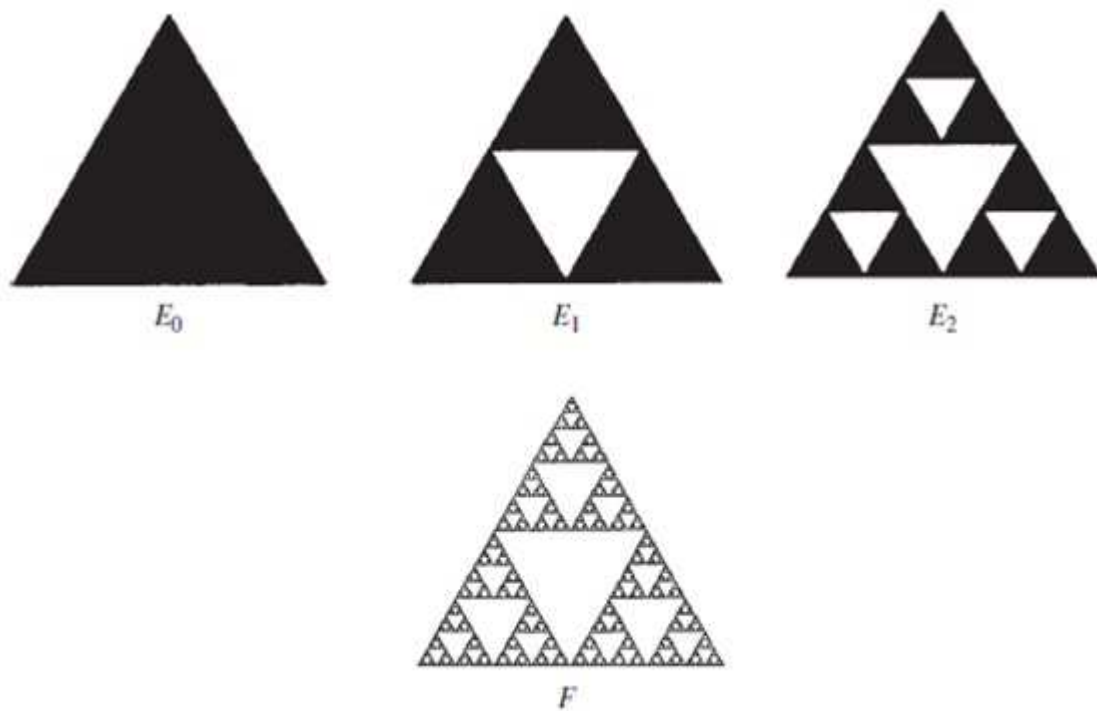


Figura 3.6 – A construção do conjunto de Sierpinski (MANDELBROT, 1983).

Uma outra forma de observar isto é imaginar que o triângulo equilátero inicial será substituído por outros três triângulos equiláteros com metade da altura do inicial.

3.1 CARACTERÍSTICAS DOS FRACTAIS

Existem diversos tipos de conjuntos fractais já definidos, como os exemplificado anteriormente, mas para que uma geometria possa ser considerada fractal precisa de algumas características, como disse Falconer (2014):

“[...] a definição de 'fractal' deve ser considerada da mesma maneira que um biólogo considera a definição de 'vida'. Não existe uma definição rígida e rápida, mas apenas uma lista de propriedades características de um ser vivo, como a capacidade de reproduzir, mover ou existir em certa medida independentemente do ambiente. A maioria dos seres vivos tem a maioria das características da lista, embora existam objetos vivos que sejam exceções a cada um deles. Da mesma forma, parece melhor considerar um fractal como um conjunto que possui propriedades, em vez de procurar uma definição precisa que quase certamente excluirá alguns casos interessantes (FALCONER, 2014).”

Assim, Falconer (2014) definiu o que considera propriedades que um conjunto deve ter para ser considerado um fractal, desta forma quando se tem um conjunto F para ser considerado um fractal deve-se ter tais características:

- F tem uma estrutura fina, isto é, detalhes em escalas arbitrariamente pequenas;

- F é irregular demais para ser descrito na linguagem geométrica tradicional, local e globalmente;
- Frequentemente, F tem alguma forma de auto-similaridade, talvez aproximada ou estatística;
- Geralmente, a "dimensão fractal" de F (definida de alguma forma) é maior que sua dimensão topológica;
- Na maioria dos casos de interesse, F é definido de uma maneira muito simples, talvez recursiva.

Estudos em geometria clássica foram estimulados por suas aplicações na natureza, tal qual assumir que a terra é uma esfera ou que orbitas planetárias têm a forma de elipse, sabe-se que a terra não é exatamente uma esfera e que orbitas não são perfeitamente elípticas, no entanto, essas aproximações foram úteis em diversos estudos. Do mesmo modo acontece com fractais, na literatura encontra-se diversos objetos da natureza como sendo fractais, por exemplo, limites de nuvens, superfícies topográficas, costas, turbulência em fluidos, entre outros. Entretanto, nenhum destes são verdadeiros fractais, pois as características fractais desaparecem em escalas suficientemente pequenas. No entanto, em certas escalas se parecem muito com fractais e podem ser considerados úteis para estudo (nessa escala). Logo, não existem verdadeiros fractais na natureza - como disse Falconer (2014), "da mesma forma que não existem linhas retas ou círculos verdadeiros" (FALCONER, 2014), (MANDELBROT, 1983)!

3.2 FRACTAIS EM ANTENAS

Sistemas de comunicação sem fio necessitam de antenas tamanhos pequenos para que possam ser incluídas nos mais diversos dispositivos e sistemas. Por este motivo, estudos no design de antenas tem se tornando um dos grandes objetivos na área de comunicação sem fio. As aplicações de tais antenas abrangem sistemas de comunicação pessoal, veículos aéreos não tripulados, pequenos terminais de comunicação via satélite, dentre outros. Desta forma, foi dada grande ênfase às antenas eletricamente pequenas, incluindo desenhos de placas impressas. No entanto, existem limites fundamentais quanto ao tamanho dos elementos da antena. As limitações básicas são impostas pelo comprimento de onda no espaço livre ao qual o elemento da antena deve ser acoplado, que foi ou se espera que seja miniaturizado, ou seja, para miniaturizar antenas é necessário que se leve em consideração limitações elétricas. Assim, a miniaturização pode ser realizada alterando a geometria da estrutura e possivelmente adicionando componentes ou integrando materiais à estrutura, mas as características de irradiação da antena original precisam ser mantidas (BALANIS, 2016).

De acordo com Balanis (2016) os limites das antenas eletricamente pequenas advêm da ideia de que toda a estrutura da antena com a maior dimensão linear de $2a$, incluindo linha de transmissão e oscilador estão todos dentro de uma esfera de raio a , como mostra a Figura 3.7. A largura de banda de uma antena (possível de ser totalmente inserida em uma esfera de raio a) pode ser melhorada apenas se a antena utilizar com eficiência, com sua configuração geométrica, o volume disponível dentro da esfera. Em relação a geometrias planares, a largura de banda pode ser melhorada de forma que a antena melhor utilize a área planar disponível de um círculo de raio a que envolve a antena.

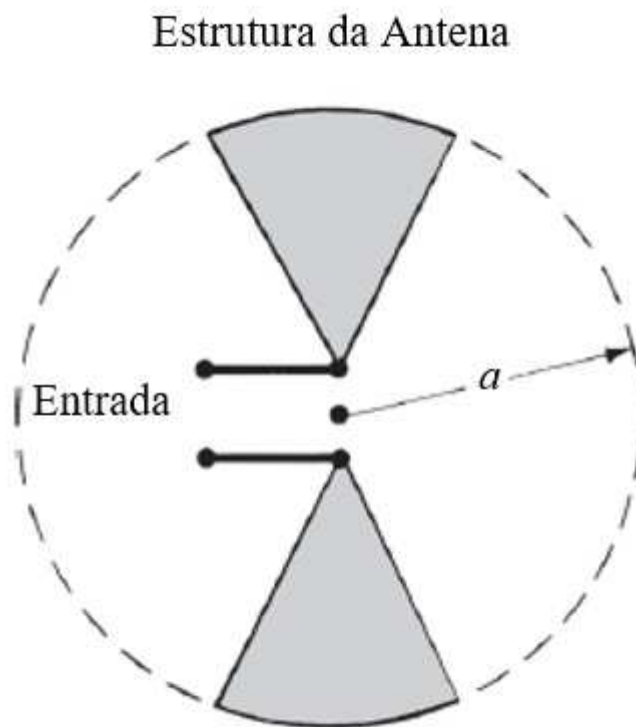


Figura 3.7 – Antena bicônica dentro de um esfera (BALANIS, 2016).

Os fractais representam uma classe de geometria com propriedades muito únicas que têm atraído a atenção de pesquisadores de diversas áreas. Tais geometrias são contornos de preenchimento de espaço, o que significa que recursos eletricamente grandes podem ser empacotados com eficiência em pequenas áreas. Como os comprimentos elétricos desempenham um papel tão importante no design da antena, esse “empacotamento” eficiente pode ser usado como técnica de miniaturização. Geometrias de fractal podem ser melhor descritas e geradas usando um processo iterativo que leva a estruturas auto-similares (GIANVITTORIO; RAHMAT-SAMII, 2002). O processo pode ser melhor ilustrado graficamente, como mostrado para as duas geometrias diferentes nas Figuras 3.8 (BALANIS, 2016):

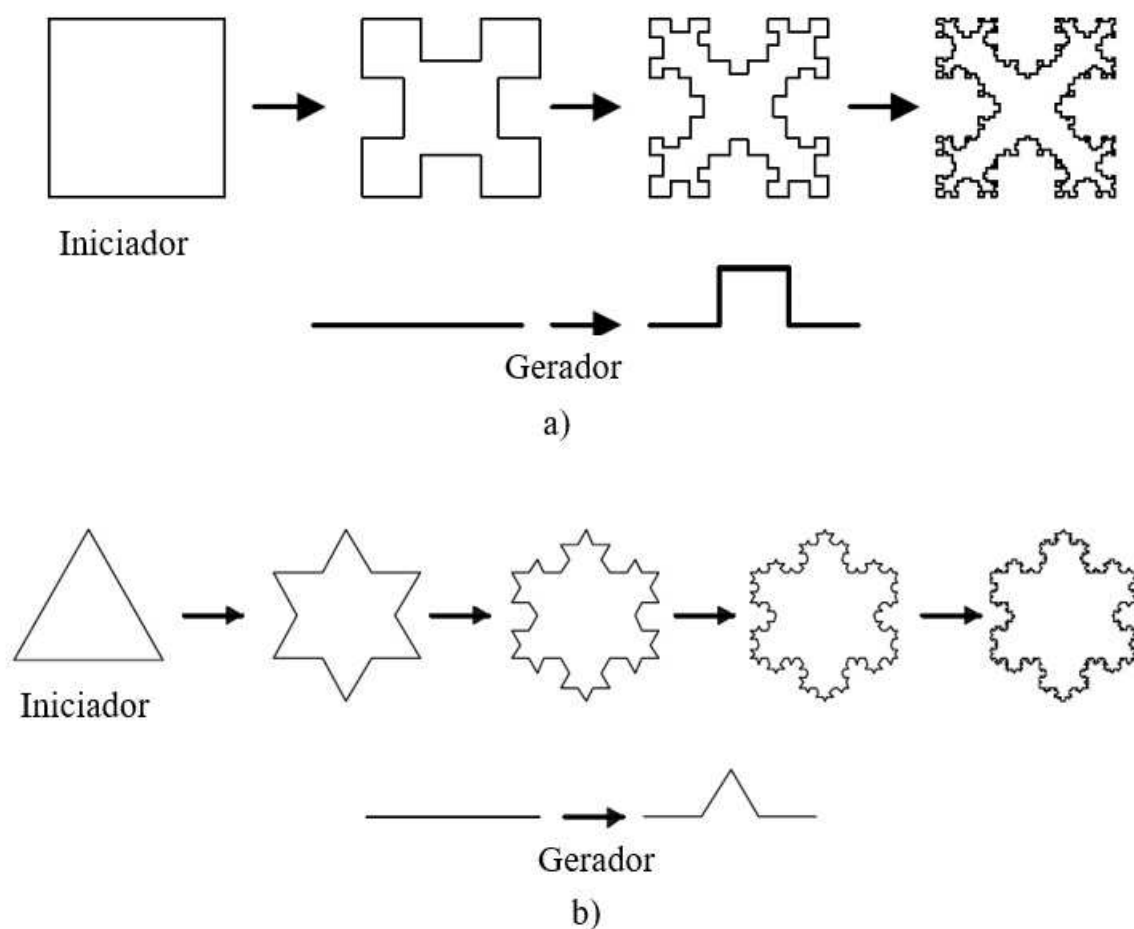


Figura 3.8 – Gerador de Fractal: a) Estrutura fractal gerada a partir de um quadrado com gerador também quadrado tendo 3 iterações; b) Estrutura fractal gerada a partir de um triângulo com gerador em forma triangular com 4 iterações (BALANIS, 2016).

O processo de geração de geometria de um fractal começa com uma geometria básica denominada iniciador, que na Figura 3.8a tem-se um quadrado e na Figura 3.8b um triângulo. 3.8a, cada um dos quatro lados do quadrado é substituído por um gerador que pode ser observado na parte inferior da Figura 3.8a, a cada iteração os seguimentos de reta da Figura anterior é substituída por um gerador em escala menor, como pode ser visto, a Figura 3.8a possui três iterações. Na Figura 3.8b, o terço médio de cada lado do triângulo é substituído por um gerador, também, em forma de triângulo, do mesmo modo que no quadrado a cada iteração as retas do triângulo são substituídas por um gerador em escala menor e isso se repete a cada iteração, como pode ser observado na Figura 3.8b em que possui 4 iterações e gerou um fractal conhecido como Floco de Neve de Von Koch. A geometria fractal final é uma curva com uma estrutura infinitamente complexa, de modo que, não importa quão perto a estrutura seja vista, os blocos de construção fundamentais não podem ser diferenciados porque são versões em escala do iniciador. Geometrias fractais são usadas para representar estruturas da natureza, como árvores, plantas, cadeias de

montanhas, nuvens, ondas e assim por diante (BALANIS, 2016).

Os conceitos de fractal foram aplicados a muitos ramos da ciência e engenharia, incluindo a eletrodinâmica fractal para radiação, propagação e espalhamento (GIANVITTORIO; RAHMAT-SAMII, 2000). Os fractais exibem propriedades de preenchimento de espaço que podem ser usadas para miniaturizar elementos clássicos de antenas, como dipolos e loops, e superar algumas das limitações das antenas pequenas. A linha usada para representar o fractal pode serpentear de maneira a preencher efetivamente o espaço disponível, resultando em curvas eletricamente longas, mas compactadas em um pequeno espaço físico (GIANVITTORIO; RAHMAT-SAMII, 2002). A utilização de fractais em antenas atendem aos requisitos, descritos por Balanis (2016), sobre utilização de espaços disponíveis dentro de uma esfera de raio a e forma eficiente. De acordo com Z.C.Alex (2013), uma antena com geometria fractal irradia melhor a energia eletromagnética e exibe menor frequência de ressonância do que uma antena dipolo euclidiana do mesmo tamanho geral. Z.C.Alex (2013) também fala que todas as propriedades descobertas sobre utilização de fractais em antenas mostram que as formas fractais são vantajosas em relação às antenas tradicionais, possuem tamanho menor e são úteis em aplicações que requerem tamanho pequeno nas faixas VHF e UHF.

Neste capítulo foram apresentadas as geometrias fractais, suas características e seu uso na área de antenas. No próximo capítulo serão demonstrados os resultados das simulações, medições e testes, bem como, a metodologia utilizada neste projeto.

4 RESULTADOS

Neste Capítulo são apresentados o resultados simulados e medidos de antenas vestíveis com pré-fractal de Koch projetadas para ressoar em Frequências Ultra-altas (UHF). Para a validação do projeto quatro antenas foram desenvolvidas, inicialmente uma antena quadrada, que deu origem a outras três antenas a partir de processos de interação em um algoritmo de pré-fractal de Koch implementado no MATLAB ®. Para as antenas foi utilizada a poliamida como substrato e cobre laminado para o elemento irradiante e plano de terra. O método de alimentação escolhido foi a linha de microfita.

As antenas de microfita apresentam baixa radiação no plano de terra, o que garante que a energia irradiada não afete o usuário, sendo uma boa alternativa para o desenvolvimento de antenas vestíveis. A partir das dimensões da antena quadrada e da linha de transmissão, calculadas de acordo com Balanis (2016) e Stutzman (2012), foram aplicadas três iterações da geometria retangular pré-fractal de Koch. As imagens geradas foram exportadas no formato DXF para simulação no software comercial *Ansys Electronics* e o *Microsoft Excel* foi utilizado para gerar os gráficos aqui apresentados. A seguir são demonstrados os procedimentos metodológicos e os resultados para as estruturas projetadas neste trabalho.

4.1 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A metodologia proposta foi dividida nas seguintes etapas principais: investigar, a partir de levantamento bibliográfico como projetar antenas flexíveis vestíveis para uso em Frequências Ultra-altas utilizando a técnica do pré-fractal de Koch; simular as estruturas de antenas projetadas com o objetivo de identificar as melhores estruturas a serem construídas; realizar a caracterização eletromagnética do substrato; construir antenas protótipos; realizar testes nos protótipos e comparar com os resultados das simulações, verificando se há discrepâncias entre ambos.

Os materiais a serem utilizados como substrato em antenas necessitam de caracterização eletromagnética. A caracterização eletromagnética, como o nome sugere, é a identificação das características eletromagnéticas desses materiais. A mesma é necessária na fabricação de dispositivos eletrônicos para se tornarem conhecidas características como a permissividade e perda dielétrica deste material. Neste trabalho, foi utilizada a poliamida como substrato, que apresenta características de flexibilidade, espessura fina, resistência mecânica e térmica adequadas para aplicações vestíveis que exigem resistência às altas temperaturas e movimento constante.

A caracterização da poliamida foi realizada no laboratório do Instituto Federal

da Paraíba (IFPB), utilizando um Analisador de rede vetorial (Vector Network Analyzer - VNA) da Agilent Technologies modelo E5071C (300 kHz - 20 GHz), por método de sonda com o programa Dielectric Probe 85070. A poliamida caracterizada apresenta permissividade dielétrica de aproximadamente, $\epsilon_r = 4$, tangente de perda de 0,004 e espessura de 0,05 mm. A camada condutora (cobre) tem uma espessura clássica de 0,035 mm. A Figura 4.1 ilustra a configuração da medição e mostra a caracterização dielétrica da poliamida.

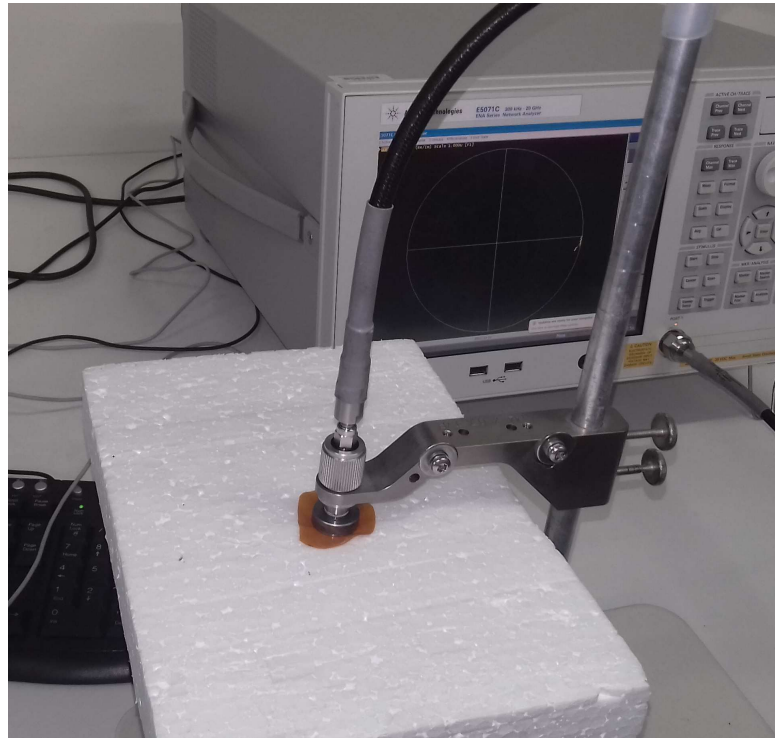


Figura 4.1 – Configuração de caracterização da Poliamida (Fonte: Autor).

Nos valores iniciais para a aproximação do *patch* e da linha de transmissão, foram utilizadas as equações para a antenas de microfita quadrada indicadas em Balanis (2016) e Stutzman (2012) e implementadas no software MATLAB ®. As simulações, com ajustes dos valores para adequação às necessidades do projeto, foram realizadas no software comercial Ansys e as antenas foram construídas com imagens projetadas no elemento condutor e pelo processo de corrosão do cobre por percloroeto de ferro. A seguir são demonstrados os resultados das simulações e comparações com as medições realizadas nos protótipos.

4.2 ANTENAS EM POLIAMIDA COM A GEOMETRIA PRÉ-FRACTAL DE KOCH

O *patch* quadrado gerado no MATLAB ®, foi exportado em formato DXF para software *Ansys Electronics* e simulado com lado de 30 mm de comprimento e a cada

iteração retirados retângulos com $1/4$ de largura e $1/8$ de comprimento. Na Figura 4.2 é demonstrado o *patch* original (quadrado), as diferentes dimensões das antenas pré-fractais de Koch a cada iteração e os protótipos construídos.

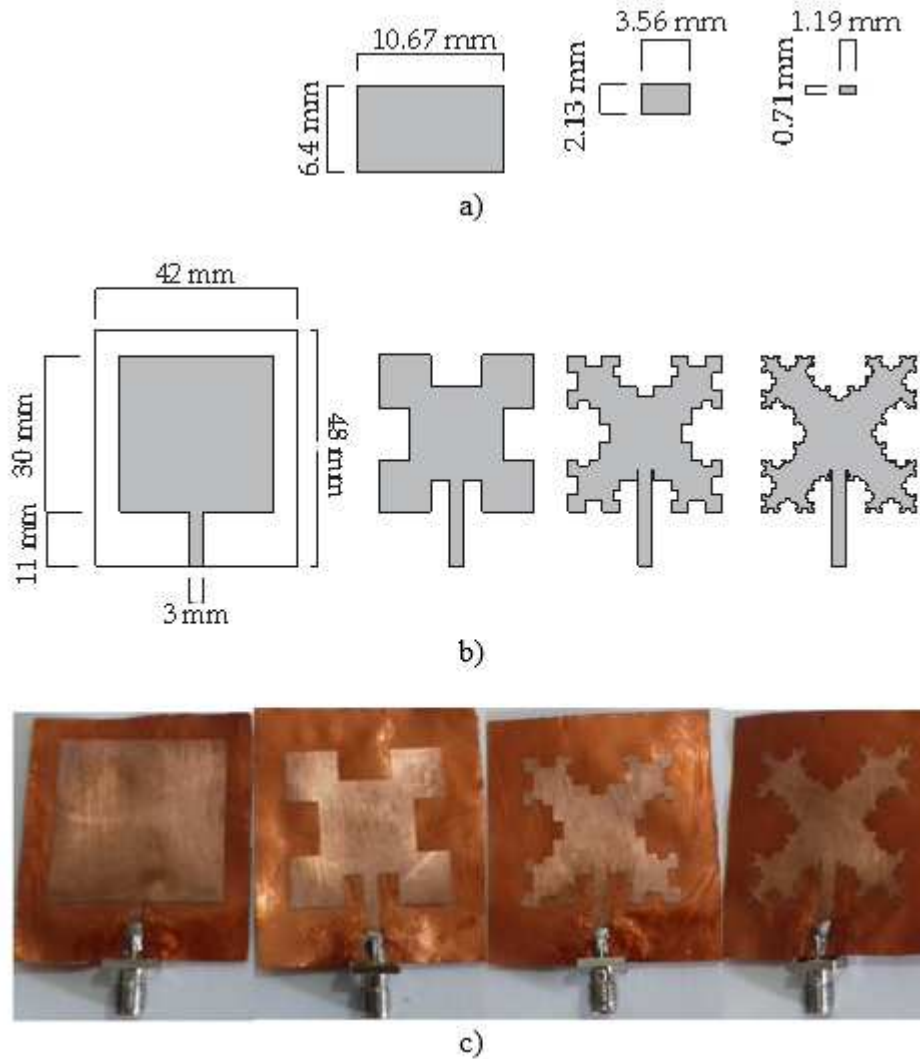


Figura 4.2 – a) Representações das dimensões dos retângulos retirados a cada iteração. b) Projeto das antenas quadrada e antenas com pré-fractal de Koch com uma, duas e três iterações, respectivamente. c) Protótipos de antenas de microfita desenvolvidas neste trabalho (Fonte: Autor).

Assim como a caracterização dos materiais, as medições das antenas vestíveis com pré-fractal de Koch, também foram realizadas no Instituto Federal da Paraíba, com o VNA da Agilent Technologies modelo E5071C (300 kHz - 20 GHz), nas bandas de frequência de 1 a 5 GHz, avaliando os parâmetros S_{11} e a impedância carta de Smith, com uma impedância de entrada de 50Ω , considerando a distância de Fraunhofer (BALANIS, 2016) (STUTZMAN, 2012), Figura 4.3:

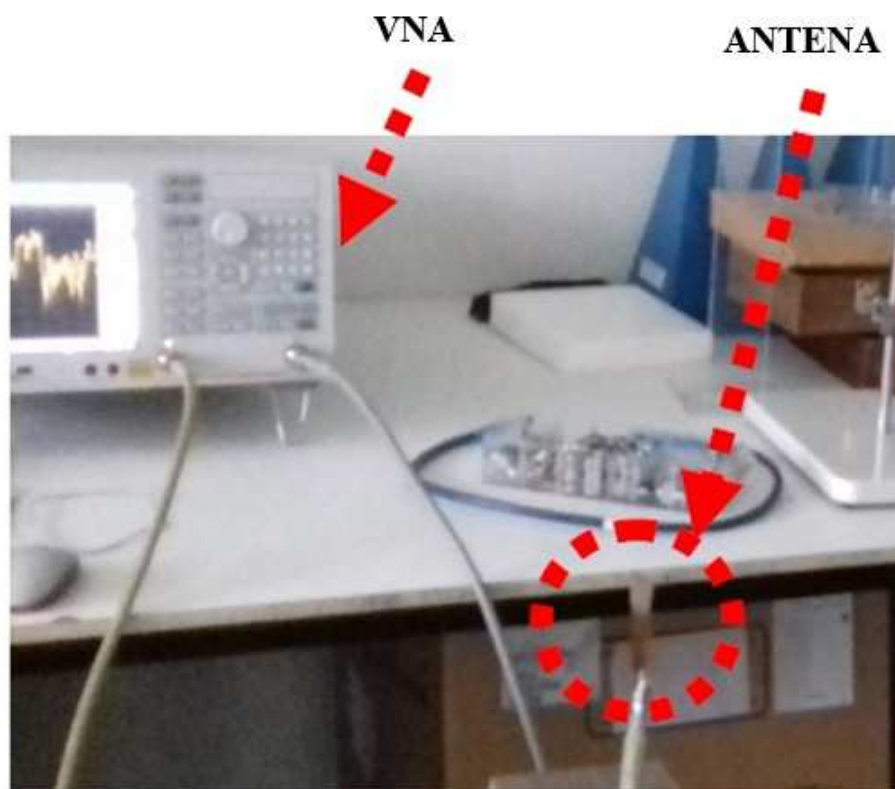


Figura 4.3 – Configuração de testes realizados nos protótipos de antenas (Fonte: Autor).

Nas Figuras 4.4, 4.5, 4.6 e 4.7 são demonstrados gráficos com os valores do parâmetro S_{11} simulados e medidos para cada uma das quatro antenas.

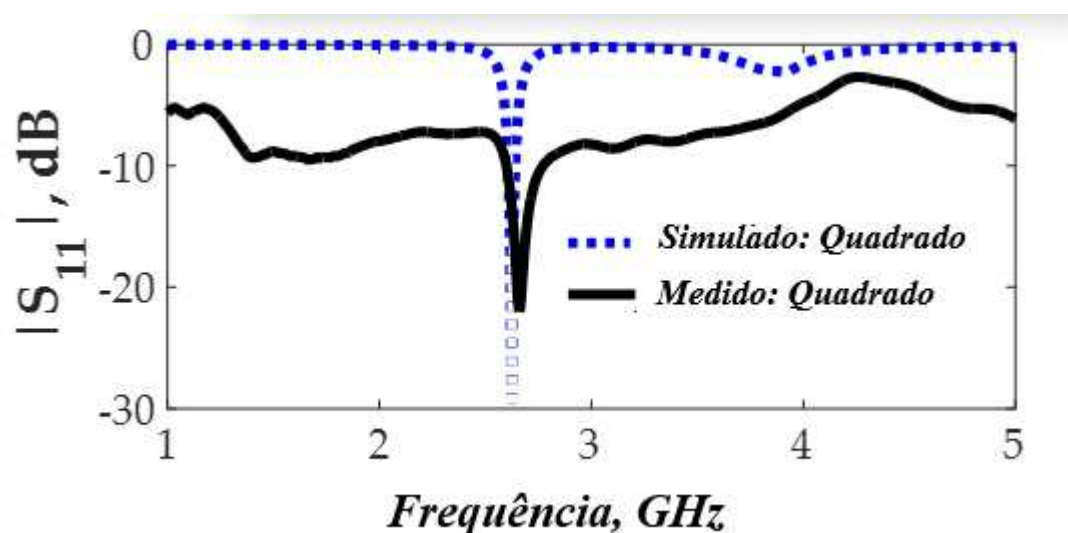


Figura 4.4 – Comparação dos resultados dos parâmetros $|S_{11}|$ simulados e medidos para a antena *patch* quadrada (Fonte: Autor).

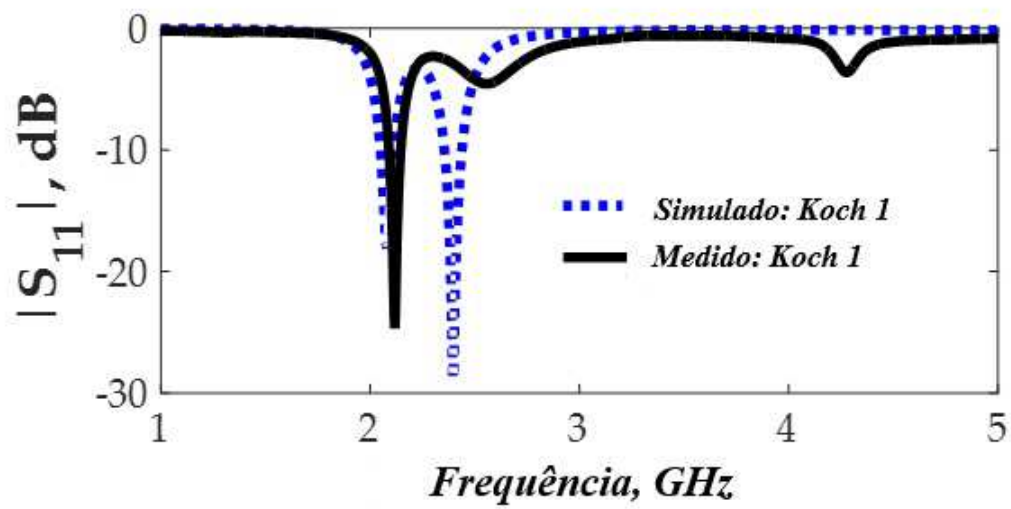


Figura 4.5 – Comparação dos resultados dos parâmetros $|S_{11}|$ simulados e medidos para da antena com pré-fractal de Koch na primeira iteração (Fonte: Autor).

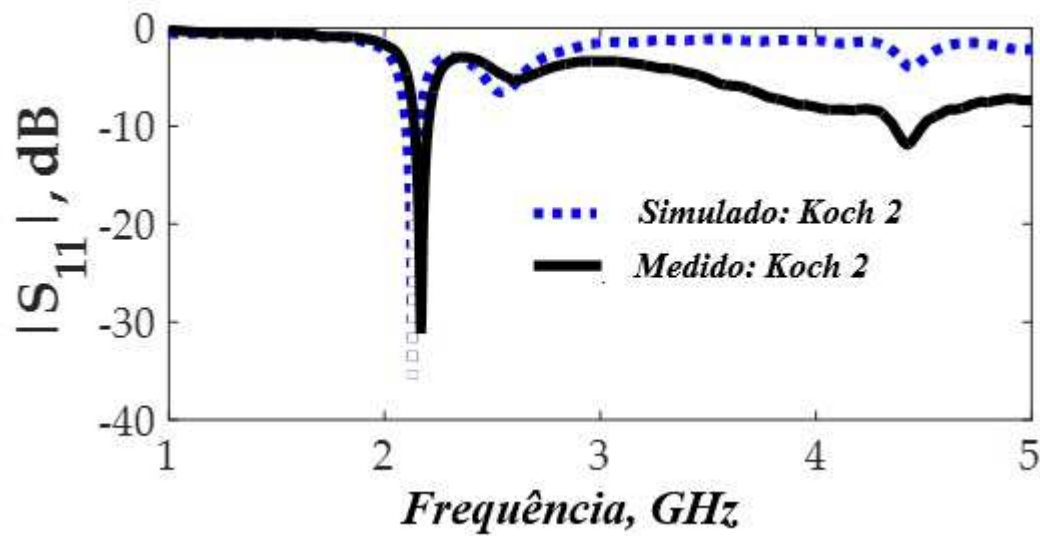


Figura 4.6 – Comparação dos resultados dos parâmetros $|S_{11}|$ simulados e medidos para da antena com pré-fractal de Koch na segunda iteração (Fonte: Autor).

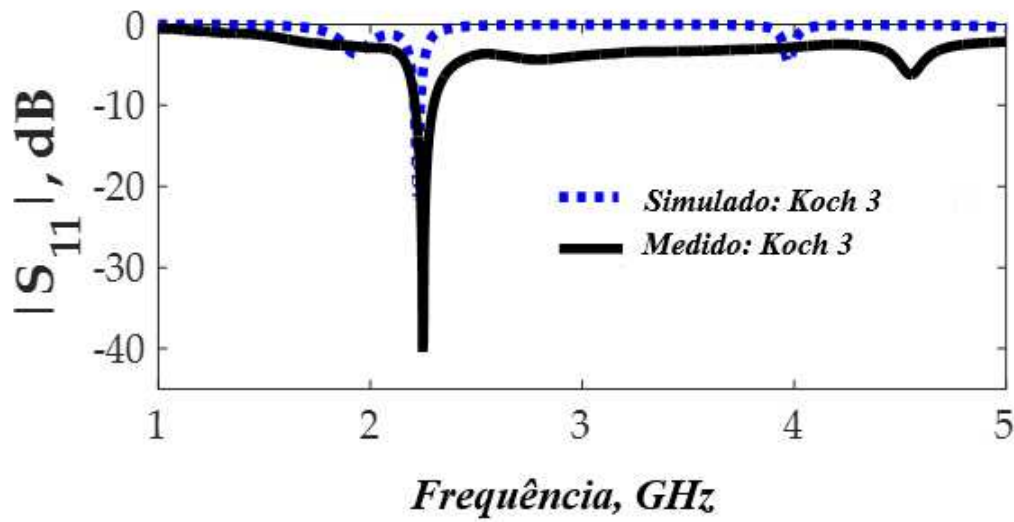


Figura 4.7 – Comparação dos resultados dos parâmetros $|S_{11}|$ simulados e medidos para da antena com pré-fractal de Koch na terceira iteração (Fonte: Autor).

Na Figura 4.8 temos a comparação entre os coeficientes de reflexão das quatro antenas.

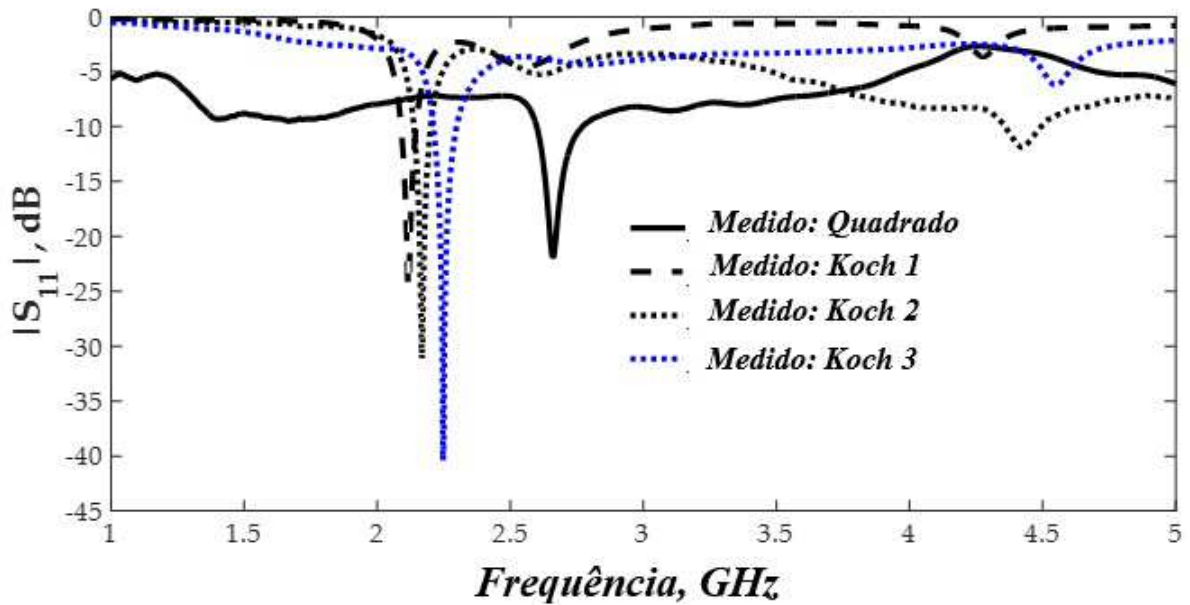


Figura 4.8 – Comparação dos resultados dos parâmetros $|S_{11}|$ medidos nos quatro protótipos de antenas desenvolvidos neste trabalho (Fonte: Autor).

A antena quadrada foi projetada com perímetro de 120 mm e frequência de ressonância (f_0) 2,63 GHz. A partir deste perímetro foram projetadas as outras três antenas com pré-fractal de Koch. À medida que o perímetro de uma antena é aumentado a

frequência de ressonância da mesma, diminui. Os valores das frequências de ressonâncias e larguras de banda (BW) em -10 dB são demonstrados na Tabela 4.1, f_0 , f_1 e f_2 representam as frequências central, inferior e superior, respectivamente.

Tabela 4.1 – *Patch* antenas vestíveis (Fonte: Autor)

<i>Antenas</i>	f_0 (GHz)	f_1 (GHz)	f_2 (GHz)	BW (MHz)
Simulado: Quadrado	2,63	2,61	2,64	30
Medido: Quadrado	2,66	2,6	2,77	110
Simulado: Koch 1	2,12	2,44	2,36	80
Medido: Koch 1	2,12	2,09	2,15	60
Simulado: Koch 2	2,17	2,1	2,16	60
Medido: Koch 2	2,13	2,14	2,2	60
Simulado: Koch 3	2,25	2,21	2,24	30
Medido: Koch 3	2,22	3,21	2,3	90

O resultados de testes realizados nos protótipos demonstraram estar muito próximos aos resultados das simulações das antenas com uma diferença máxima de 1.8% na frequência de ressonância para a segunda interação do pré-fractal de Koch. Em comparação com a antena quadrada, a antena com a primeira interação do pré-fractal de Koch apresentou a maior queda na frequência de ressonância (20.3%), enquanto as outras interações demonstraram uma diferença pequena. Quanto a largura de banda, a maior variação pode ser observada na terceira interação.

As simulações dos diagramas de irradiação 3D com ganho (dBi) podem ser observados na Figura 4.9. Todas as antenas apresentaram um diagrama de radiação do tipo *end-fire* com ganho superior a 5 dBi.

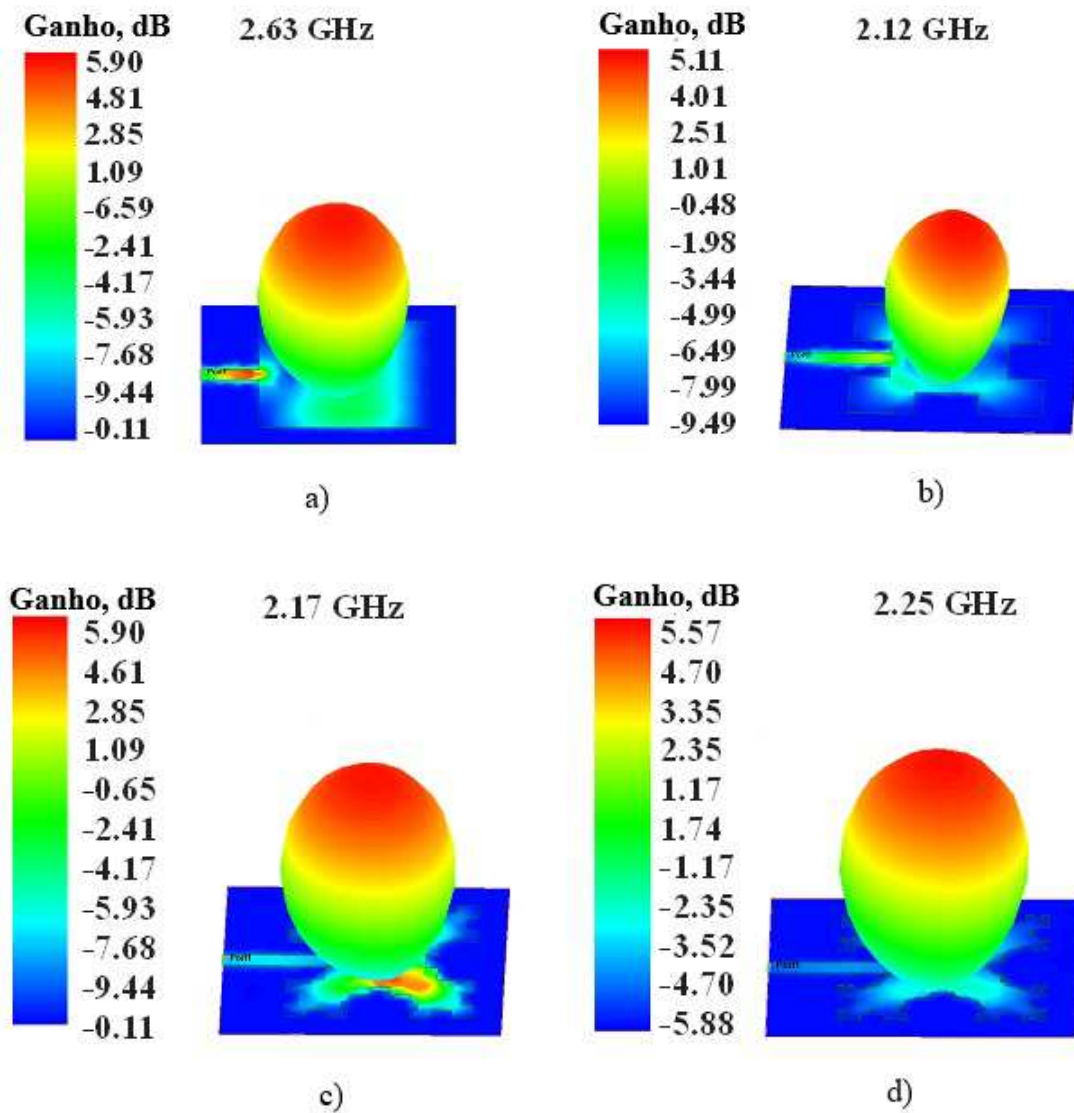


Figura 4.9 – Diagramas de irradiação 3D: a) Antena Quadrada com frequência de ressonância de 2,63 GHz; b) Antena com primeira iteração do pré-Fractal de Koch e frequência de ressonância de 2,12 GHz; c) Antena com segunda iteração do pré-Fractal de Koch e frequência de ressonância de 2,17 GHz; d) Antena com terceira iteração do pré-Fractal de Koch e frequência de ressonância de 2,25 GHz (Fonte: Autor).

Na Figura 4.10 são ilustradas as simulações das densidades de corrente (A/m^2) para cada antena. A primeira iteração do pré-fractal de Koch demonstra ter a melhor densidade de corrente ($53.4 A/m^2$) como pode ser observado na Figura 4.10b.

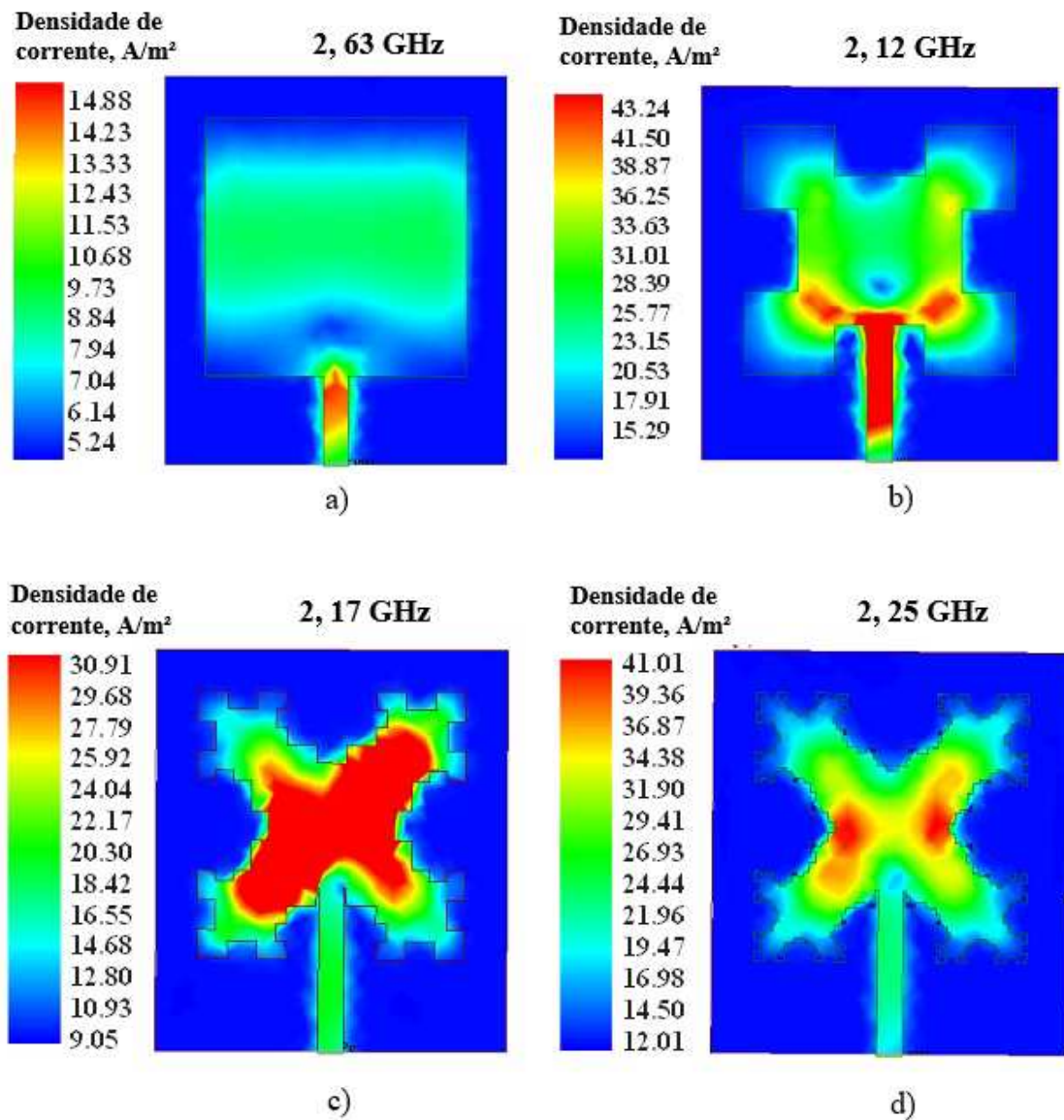


Figura 4.10 – Densidades de corrente: a) antena quadrada; b) antena com primeira iteração do pré-fractl de Koch; c) antena com segunda iteração do pré-fractl de Koch; d) antena com terceira iteração do pré-fractl de Koch (Fonte: Autor).

A Figura 4.11 ilustra as impedâncias sobre a carta de Smith medidas nas antenas de 1 a 5 GHz. Todas as antenas demonstraram ter impedância de entrada próximas a 50Ω , ou seja, é possível identificar o casamento das impedâncias entre a a linha de alimentação e os elementos irradiantes (50Ω).

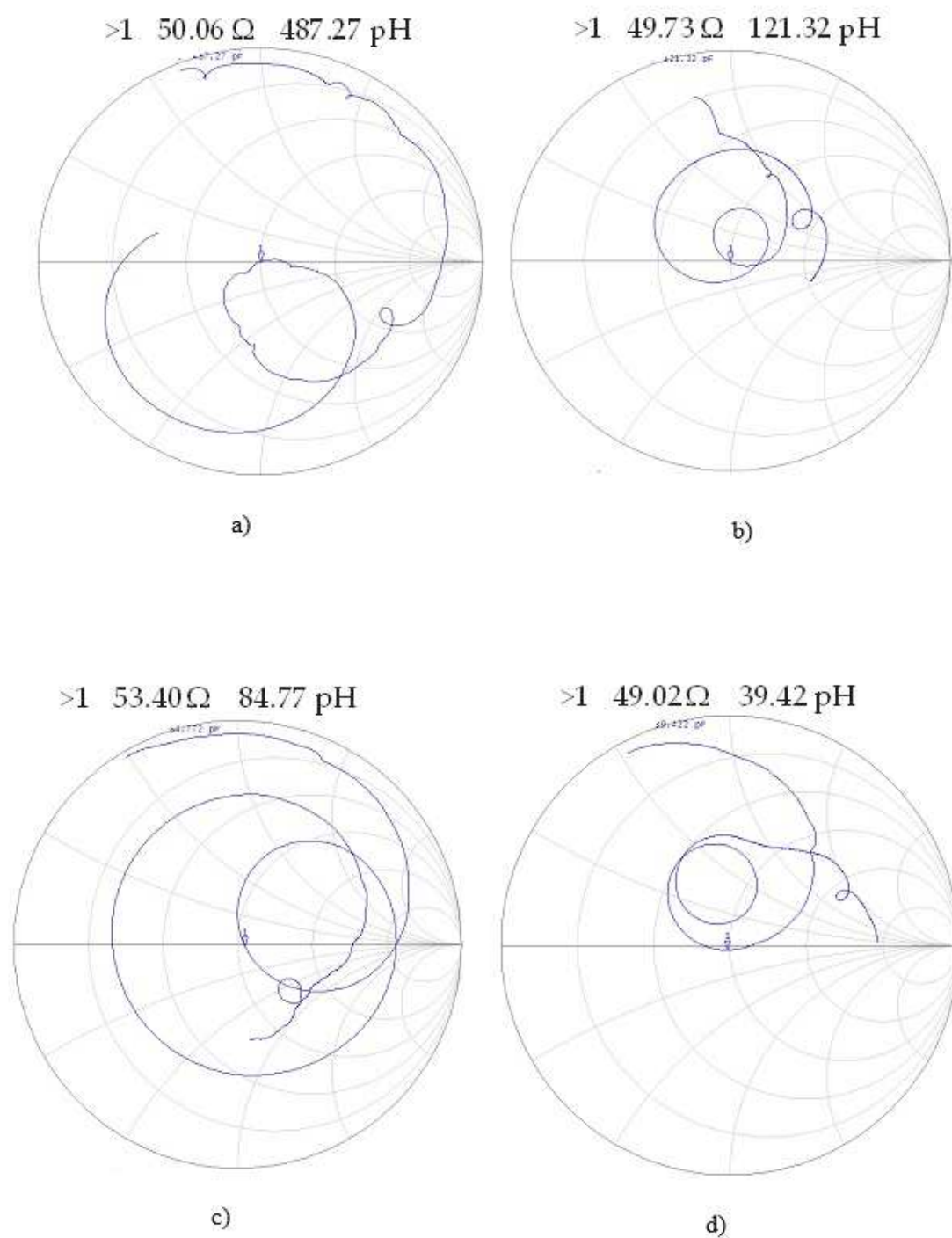


Figura 4.11 – Impedâncias na carta de Smith: a) Antena quadrada 50.06Ω ; b) Antena com primeira iteração do pré-fractal de Koch 49.73Ω ; c) Antena com segunda iteração do pré-fractal de Koch 53.40Ω ; d) Antena com terceira iteração do pré-fractal de Koch 49.02Ω (Fonte: Autor).

A Figura 4.12 ilustra a simulação do diagrama de irradiação das antenas projetas com indicação da largura de feixe de meia potência (HPBW) e relação frente-costas (F/B).

Pode-se observar que o uso de pré-fractais de Koch fornece variação no ângulo de incidência da potência máxima, com um HPBW de 102° para o elemento quadrado, 89° , 98° e 94° para a primeira, segunda e terceira iteração de pré-fractais de Koch, respectivamente. Uma variação da relação F/B também pode ser observada com 35,2 dB para o elemento quadrado, 29,4 dB, 17,2 dB e 19,3 dB para a primeira, segunda e terceira iteração dos pré-fractais de Koch, respectivamente.

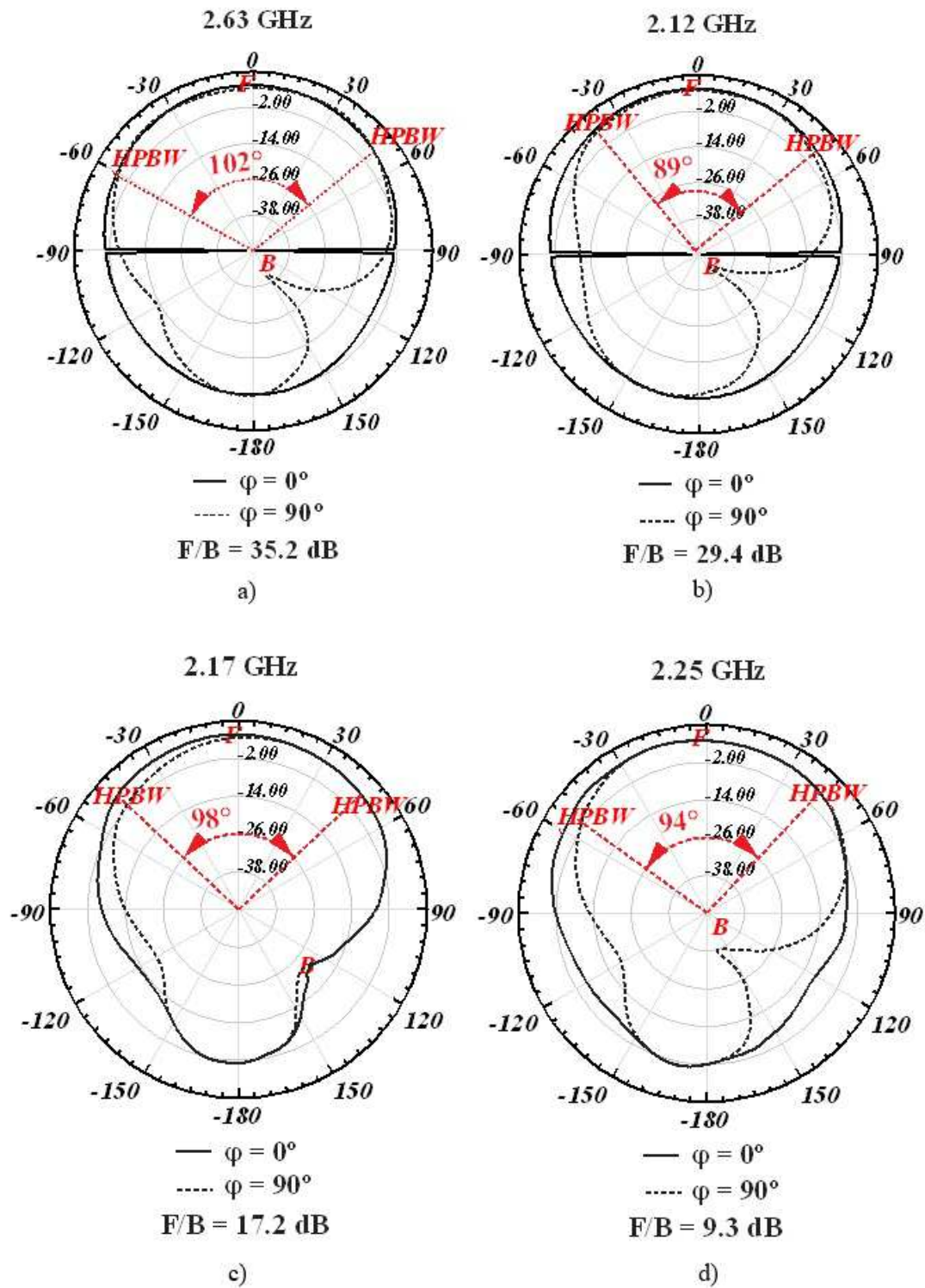


Figura 4.12 – Diagrama de irradiação 2D com largura de feixe de meia potência (HPBW) e relação frente costas: a) Antena quadrada; b) Antena com pré-fractal de Koch 1; c) Antena com pré-fractal de Koch 2; d) Antena com pré-fractal de Koch (Fonte: Autor).

Baseando-se nos resultados das simulações e medições podemos observar que em comparação com a antena quadrada as antenas com aplicação da geometria fractal

demonstraram queda na frequência de ressonância, comprovando que o uso da geometria fractal de Koch consegue aumentar o perímetro sem a necessidade aumentar o tamanho da antena. Pode ser observado, também, que na terceira iteração a frequência de ressonância não sofreu queda tão grande quanto esperado, isto se deve ao fato de que os cortes criados durante as iterações foram cada vez menores, de modo que ao energizar a antena a corrente elétrica acaba por "ignorar" aquela pequena fenda por uma borda estar muito próxima a outra, deste modo, ao invés de se ter um perímetro maior, a corrente percorre um caminho menor pois ignora os cortes menores, fazendo com que a frequência de ressonância não mude tanto quanto esperado. Isto explica, ainda, o motivo para não se ter desenvolvido protótipos com mais iterações, pois a corrente "ignoraria" os cortes de qualquer forma. Além do mais, a construção de antenas com mais iterações também exigiria que os cortes fossem cada vez menores e, isto tornaria o processo de construção da antena dificultoso já que a área utilizada é pequena e os cortes mínimos a cada iteração, tornando extremamente difícil realizar tais cortes numa área tão pequena.

A partir dos resultados, pode ser observado que as antenas pré-fractal de Koch em poliamida apresentaram compatibilidade para o uso em aplicações médicas sem fio com ganho máximo de 5,9 dBi, HPBW acima de 89°, indicando baixa concentração de sinal e valores das frequências de ressonância simuladas e medidas, próximos. Os resultados, também, demonstram que estas antenas construídas em poliamida podem ser utilizadas em aplicações médicas, pois demandam estruturas resistentes a maior intensidade térmica, intensidade de movimento e a níveis altos de umidade, com pequenas diferenças entre valores medidos e simulados.

Comparando os resultados obtidos neste trabalho com os resultados de antenas pré-fractais construídas em material FR4 nos trabalhos de Silva (2009) e Silva (2010), foi observado que as antenas em poliamida com pré-fractal de Koch apresentaram resultados semelhantes de variação de frequência de ressonância, largura de banda e ganho em relação às antenas construídas em FR4, entretanto, as antenas construídas em poliamida apresentaram as vantagens de serem estruturas flexíveis, resistentes a torções mecânicas e umidade e altas temperaturas.

Neste capítulo foram expostos os resultados de simulações, testes e medições dos protótipos realizados ao longo deste projeto. No próximo capítulo serão feitas as considerações finais, propostas de trabalhos futuros e artigos publicados.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho propôs um estudo e desenvolvimento de antenas flexíveis de microfitas vestíveis aplicando pré-fractal de Koch com até três iterações e utilizando a poliamida como substrato para uso em aplicações médicas. O procedimento metodológico abrange a escolha da tecnologia a ser aplicada, a escolha do tipo de antena, material dielétrico e condutor com a devida caracterização, escolha do fractal a ser gerado no MATLAB, exportação das imagens para o simulador, a construção de protótipos, a medição e a comparação dos resultados.

Através das simulações e medições dos protótipos de antenas construídas neste trabalho, pode-se verificar que a aplicação do pré-fractal retangular de Koch sobre a antena quadrada apresentou frequências de ressonâncias e larguras de banda próximas, indicando que há concordância do projeto simulado com o medido. O uso de pré-fractal possibilitou, também, antenas com estruturas mais compactas, perímetros maiores consequentemente aumentando o comprimento elétrico, além de maiores ganhos na frequência de ressonância, melhor perda de retorno, com largura de banda de operação adequada para a faixa requerida. Observou-se, também, que a construção de antenas com mais iterações não teriam resultados satisfatórios, pois a corrente elétrica acaba por ignorar os cortes muito pequenos, como é o caso da antena com três iterações que demonstrou ter menor queda na frequência de ressonância comparada às antenas com uma e duas iterações. Comparando os resultados de antenas pré-fractais construídas com FR4 como substrato, pode-se observar que antenas com substrato de poliamida tem variação frequência de ressonância, largura de banda e ganho similares, entretanto, as antenas com substrato de poliamida tem as vantagens de possuir estrutura flexível, resistência mecânica, a umidade e às altas temperaturas.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Como trabalhos futuros propõe-se:

- Aprimorar a metodologia apresentada fazendo investigação do uso dos fractais de Koch triangulares em antenas de microfita;
- Pesquisar o desenvolvimento de antenas de microfita com fractais para aplicações em 5G;
- Avaliar o uso do *jeans*, e outros materiais textéis, como substrato em antenas de microfita com fractais para uso junto ao corpo.

5.2 ARTIGOS PUBLICADOS

- A. d. S. F. Evangelista, P. F. da Silva, E. E. C. Santanta, M. S. P. Silva, R. C. S. Freire, A. J. R. Serres, J. F. d. Araújo, M. A. de Oliveira, P. H. d. F. Silva, "Wearable Koch Pre-Fractal Antennas for Ultrahigh Frequency Band," 2019 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), Auckland, New Zealand, 2019, pp. 1-5.

REFERÊNCIAS

- ANATEL. *Plano de Atribuição, Destinação e Distribuição de Frequências no Brasil*. 2018. Disponível em: <<https://www.anatel.gov.br/setorregulado/atribuicao-destinacao-e-distribuicao-de-faixas>>. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 34.
- BALANIS, C. A. *Antenna Theory Analysis And Design*. Fourth edition. [S.l.]: Wiley, 2016. Citado 23 vezes nas páginas 7, 8, 16, 17, 18, 19, 20, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 43, 44, 45, 46, 47, 48 e 49.
- BONG, Y. H. N. E. H. L. K. Y. L. F. L.; CHUNG, B. K. Compact z-slotted patch antenna for uhf metal-mountable tag. *IEEE*, 2018. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8846550>>. Citado na página 34.
- CHOWDHURY, B. R. P. P. S. S. Wideband rectangular wearable jeans antenna. 2012. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/mop.27548>>. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 32.
- D'ASSUNÇÃO, P. H. da F. Silva; Albanisa F. dos S. R. M. C. A. G. Dual-band bandstop frequency selective surfaces with gosper prefractal elements. v. 54, n. 3, p. 771 – 775, 2012. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/mop.26663>>. Citado na página 13.
- EL-BENDARY, M. A. M. *Developing Security Tools of WSN and WBAN Networks Applications*. [S.l.]: Springer Japan, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 31.
- FALCONER, K. *Fractal Geometry*. 3. ed. [S.l.]: Wiley, 2014. Citado 9 vezes nas páginas 8, 13, 35, 36, 38, 39, 41, 42 e 43.
- GHATAK, B. B. R.; PODDAR, D. R. A fern fractal leaf inspired wideband antipodal vivaldi antenna for microwave imaging system. *IEEE*, v. 65, 2017. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8023981>>. Citado na página 14.
- GIANVITTORIO, J. P.; RAHMAT-SAMII, Y. Fractal element antennas: A compilation of configurations with novel characteristics. *IEEE*, p. 1688 – 1691, 2000. Citado na página 46.
- GIANVITTORIO, J. P.; RAHMAT-SAMII, Y. Fractal antennas:: A novel antenna miniaturization technique and applications. *IEEE*, v. 44, n. 1, 2002. Citado 2 vezes nas páginas 44 e 46.
- GOOGLE. *Ireland Map*. 2020. Disponível em: <<https://www.google.com/maps/place/Irlanda/@53.3623854,-10.4601123,7z/data=!3m1!4b1!4m5!3m4!1s0x4859bae45c4027fb:0xcf7c1234cedbf408!8m2!3d53.41291!4d-8.24389>>. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 37.
- HASHMI, D. R. . M. Design and analysis of wearable patch antenna array for mban applications. *IEEE*, 2016. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/7561201/authors#authors>>. Citado na página 13.

HEDAYATI, H. O. S. Microstrip multiband fractal dipole antennas using the combination of sierpinski, hilbert and giuseppe peano fractals. *IEEE*, 2014. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/7088955>>. Citado na página 14.

HU, Y.; XIA, W.; SHEN, L. Study of anti-interference mechanisms of multiple WPANs accessing into a HAN. *IEEE*, IEEE, 2007. Citado na página 31.

IEEE. IEEE standard definitions of terms for antennas. IEEE, 1969. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/7366531>>. Citado na página 16.

IEEE. IEEE standard definitions of terms for antennas. *IEEE*, IEEE, 1983. Citado na página 16.

JIANG, Y. L. W. L. C. L. T. A printed diversity cantor set fractal antenna for ultra wideband communication applications. *IEEE*, 2012. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/6408695>>. Citado na página 14.

KAVITHA, A.; SWAMINATHAN, J. N. Design of flexible textile antenna using fr4, jeans cotton and teflon substrates. 2018. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s00542-018-4068-y>>. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 33.

KHALEEL, H. R. *Innovation in Wearable and Flexible Antennas (WIT Transactions on State-of-the-art in Science and Engineering)*. [S.l.]: WIT Press / Computational Mechanics, 2014. ISBN 978-1-84564-986-9. Citado 3 vezes nas páginas 12, 26 e 31.

KUMAR, H. S. S. . A. T. . R. K. . G. C. . N. A small patch antenna for uhf rfid reader devices. *IEEE*, 2016. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/7578874>>. Citado na página 34.

KUMAR, N. P. G. D. R. M. D. M. Advancement in ultra wideband antennas for wearable applications. v. 4, 2013. Disponível em: <<https://www.ijser.org/paper/Advancement-in-Ultra-Wideband-Antennas-for-Wearable-Applications.html>>. Citado na página 13.

LIM, Y.-H. L. B.-K. C. E.-H.; BONG, F.-L. Miniature slotted-folded-patch antenna for on-metal uhf tag. *IEEE*, 2018. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8538276>>. Citado na página 34.

LONDOÑO, J. Wireless antenas. 2009. Disponível em: <<http://jhonatanlondon.blogspot.com/2009/09/diagrama-de-radiacion-patron-de.html>>. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 20.

MANDELBROT, B. B. *The fractals geometry of nature*. [S.l.]: W. H. Freeman, 1983. Citado 10 vezes nas páginas 8, 13, 35, 36, 38, 39, 40, 41, 42 e 43.

MERSANI, A.; OSMAN, L. Design of dual-band textile antenna for 2.45/5.8-ghz wireless applications. 2016. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/7905651>>. Citado na página 13.

MOTTA, R. *Plantas matemáticas: Os fractais na natureza*. 2015. Disponível em: <<https://paisagismodigital.com/noticias/?id=plantas-matematicas:-os-fractais-na-natureza-|-paisagismo-digital&in=439>>. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 38.

- OSÓRIO, C. *A simetria dos flocos de neve*. 2010. Disponível em: <<https://catiaosorio.wordpress.com/2010/01/10/a-simetria-dos-flocos-de-neve/>>. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 38.
- PARET, D. *RFID at ultra and super high frequencies: Theory and application*. [S.l.]: Wiley, 2009. Citado na página 33.
- PARUI, C. K. N. S. B. A. C. S. K. A body wearable antenna based on jeans substrate with wide-band response. 2018. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8474082>>. Citado 3 vezes nas páginas 12, 13 e 33.
- RAHMAT-SAMII, J. G. . J. R. . S. B. . Y. Self-similar prefractal frequency selective surfaces for multiband and dual-polarized applications. *IEEE*, v. 51, p. 3088 – 3096, 2003. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/1243507>>. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 14.
- SHAFIQUE, K. et al. A wearable ultra-wideband antenna for wireless body area networks. *Microwave and Optical Technology Letters*, v. 58, p. 1710–1715, 07 2016. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/301609883_A_wearable_ultra-wideband_antenna_for_wireless_body_area_networks>. Citado na página 13.
- SHARMA, T. et al. Analogous study of 4g and 5g. p. 2137–2140, mar. 2016. Citado na página 12.
- SHAVIT, P. S. V. V. S. S.-A. R. Wearable antennas design for wireless communication. 2017. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8244796>>. Citado 3 vezes nas páginas 7, 13 e 32.
- SILVA, A. G. D. M. R. Silva ; C. L. Nóbrega; P. H. da F. A new configuration of planar monopole quasi-fractal antenna for wireless communications. *IEEE*, 2010. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/5481786>>. Citado na página 59.
- SILVA, E. E. C. de Oliveira; P. H. da F. Silva; A. L. P. S. Campos; Sandro Gonçalves da. Overall size antenna reduction using fractal elements. v. 51, n. 3, p. 671 – 675, 2009. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/mop.24171>>. Citado na página 59.
- SILVA JUNIOR, P. *Projeto se Antenas Bioinspiradas em Plantas para Sistemas de Comunicação sem Fio*. phdthesis, 2015. Disponível em: <http://editor.ifpb.edu.br/campi/joao-pessoa/cursos/pos-graduacao-stricto-sensu/mestrado-em-engenharia-eletrica/arquivos/PROJETO_DE_ANTENAS_BIOINSPIRADAS_EM_PLANTAS_PARA_SISTEMAS_DE_COMUNICACAO_SEM_FIO.pdf>. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 33.
- SILVA JUNIOR, P. Wearable textile bioinspired antenna 2g, 3g, and 4g systems. *Microwave and Optical Technology Letters*, v. 58, p. 2818–2823, 09 2016. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/309014592_Wearable_Textile_Bioinspired_Antenna_2G_3G_and_4G_Systems>. Citado na página 13.
- SILVA JUNIOR, P. et al. Bio-inspired wearable antennas. In: _____. *Wearable Technologies*. [S.l.]: InTech, 2018. Citado 5 vezes nas páginas 13, 14, 26, 31 e 33.

STUTZMAN, G. A. T. W. L. *Antenna Theory and Design*. 3. ed. [S.l.]: PAPERBACKSHOP UK IMPORT, 2012. ISBN 978-0-470-57664-9. Citado 16 vezes nas páginas 7, 12, 16, 18, 19, 20, 21, 22, 25, 28, 29, 30, 31, 47, 48 e 49.

WANG, H.; YANG, G. Design of 4 x 4 microstrip quasi-yagi beam-steering antenna array operation at 3.5ghz for future 5g vehicle applications. *IEEE*, IEEE, 2017. Citado na página 13.

WANG, Y. W. Z.; LI, J. Uhf moore fractal antennas for online gis pd detection. *IEEE*, v. 16, p. 1536 – 1225, 2017. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/7569088>>. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 34.

YANG, Z. Y. . J. Y. . C. Z. . Z. An improved koch snowflake fractal broadband antenna for wireless applications. *IEEE*, 2018. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8260462>>. Citado na página 14.

Z.C.ALEX, P. P. K. D. R. P. D. T. Miniaturized dipole antenna using koch fractal technique for wearable application. *IEEE*, 2013. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/6577153>>. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 46.